

14 **FOCUS**
Sogin nella centrale
nucleare del Garigliano

28 **FOCUS**
Sorgenti di neutroni
per la salute dell'uomo

34 **FOCUS**
DTT per lo studio dei
carichi termici

Energia ambiente e innovazione

N. 4/2017
www.enea.it

ENEA magazine

ISSN: 1124 - 0016

Nucleare
*dal Passato
alle Opportunità*

Interview

Meera Venkatesh,
International Atomic Energy
Agency (IAEA)

Editoriale



di Aldo Pizzuto

Le attività di ricerca e sviluppo sulle tecnologie nucleari sono, per un Paese avanzato, un patrimonio prezioso che alimenta sviluppo e competitività, oltre a garantire un grande servizio Paese come quello della gestione della sicurezza, anche a fronte dell'abbandono del nucleare inteso come produzione dell'energia elettrica.

Le tematiche che si rifanno alla tecnologia nucleare hanno importanti ricadute sulla vita di tutti i giorni. Queste positive ricadute riescono, però, ad essere percepite come positive solo se disgiunte dal termine nucleare. In questo senso si usano termini come applicazioni biomedicali (diagnostica e terapia medica), metodiche per la sicurezza della popolazione (mitigazione del rischio), gestione dei rifiuti radioattivi presenti sul territorio nazionale, che sono solo alcune applicazioni del nucleare che contribuiscono al benessere del cittadino, di cui fanno parte, tra l'altro, le metodiche di radioterapia e la ricerca sui radiofarmaci.

L'Italia, dopo l'abbandono dell'energia nucleare da fissione, è impegnata nello sviluppo dell'energia da fusione – che è considerata a livello mondiale una delle pochissime opzioni, da affiancare alle rinnovabili, per un futuro energetico sostenibile – e nelle ricerche di tecnologie destinate ai reattori di quarta generazione, fondamentali per contribuire alla realizzazione di reattori intrinsecamente sicuri e capaci di chiudere il ciclo del combustibile, uno dei maggiori problemi degli attuali impianti a fissione.

Un capitolo a parte riguarda la fusione nucleare. La cosiddetta energia delle stelle potrebbe, nel futuro, diventare la fonte energetica per eccellenza: pulita, praticamente illimitata e competitiva a livello economico e di accettabilità da parte della popolazione. Diversi contributi presentano gli aspetti fondamentali di questa tecnologia e lo stato di avanzamento delle principali *facility* in corso di realizzazione e/o di progettazione in campo internazionale. Non a caso alla fusione, in particolare a ITER, è dedicata quasi tutta la parte internazionale della Rivista.

Da sottolineare come nel campo nucleare il sistema Ricerca, quello dell'industria e della Formazione hanno attivato delle sinergie formidabili che hanno permesso al nostro Paese di posizio-



narsi tra i maggiori protagonisti in molti settori come quello della fusione, delle tecnologie dei metalli liquidi per i reattori di IV generazione e degli studi di sicurezza, con grandi benefici per la competitività globale delle nostre imprese e il livello formativo dei nostri atenei che in questi settori ha mantenuto un livello di eccellenza.

In questo numero della Rivista, comunque, non ci siamo sottratti a un tema materia di confronto tra due diverse visioni del mondo. Il riferimento è alle attività in corso per risolvere definitivamente la legacy del passato uso dell'energia da fissione per la produzione di energia elettrica.

Altro tema di grande attualità è il *decommissioning* delle centrali nucleari e degli impianti del ciclo del combustibile operativi in Italia fino al referendum del 1987. Questi impianti sono giunti al confine della cosiddetta *isola nucleare*: la maggior parte delle attività propedeutiche sono state portate a termine e nel prossimo periodo inizierà la fase di smantellamento della parte più interna, e quindi più contaminata, degli impianti. In questa fase si ha la maggior produzione di rifiuti radioattivi e diventa sempre più attuale la finalizzazione del processo di realizzazione del Deposito Nazionale per lo smaltimento definitivo dei rifiuti.

L'iter di identificazione delle aree potenzialmente idonee ad ospitare il deposito è giunto a un passo dalla fase cruciale della pubblicazione della mappa che raccoglie tutti i siti che rispettano i criteri di esclusione stabiliti dall'Autorità di Controllo Nazionale nella Guida Tecnica n. 29: la pubblicazione della mappa darà l'impulso alla fase di coinvolgimento della popolazioni e delle comunità locali interessate che, secondo la normativa vigente, porterà alla realizzazione del sito che ospiterà, temporaneamente o in modo definitivo, tutti i rifiuti radioattivi prodotti sul territorio nazionale, qualunque sia la loro origine.

A questo punto diventerà fondamentale la comunicazione, intesa non solo come mero passaggio delle informazioni dall'alto verso basso, ma nel senso anglosassone del termine dove *communication* è sinonimo di *participation*. Come si vede nella parte internazionale della Rivista nel campo della fusione, e in particolare di ITER, il coinvolgimento del cittadino ha avuto un ruolo strategico. Speriamo che questo ruolo possa averlo anche per il deposito unico, anche se le storie recenti non inducono all'ottimismo. Bisogna avere comunque la consapevolezza che la partecipazione del cittadino non può essere vista come un adempimento burocratico ma come una necessità che abbisogna di ricerca. Di tutto ciò crediamo che questo numero della Rivista ENEA abbia tenuto conto nella speranza che si arrivi a una seria discussione tra i vari attori sociali che possa somigliare a una rivoluzione di velluto piuttosto che a una contrapposizione aprioristica.

N. 4/2017

Direttore Responsabile

Gaetano Borrelli

Comitato di direzione

Gian Piero Celata, Tullio Fanelli, Roberto Moneta, Roberto Morabito, Aldo Pizzuto

Comitato tecnico-scientifico

Paola Batistoni, Ilaria Bertini, Paola Carrabba, Paolo Di Lazzaro, Andrea Fianza, Giorgio Graditi, Aurelio La Barbera, Sergio La Motta, Michele Marrocco, Laura Maria Padovani, Giovanni Puglisi, Roberta Roberto

Coordinamento editoriale

Giuliano Ghisu

Revisione editoriale

Marina Fortuna

Collaboratori

Luciano De Martino, Paola Del Nero, Maria Grazia Oteri

Revisione lingua inglese

Carla Costigliola

Progetto grafico

Paola Carabotta

Edizione web

Antonella Andreini, Marina Fortuna, Serena Lucibello, Concetta Manto

Promozione e comunicazione

Paola Giaquinto

Impaginazione

Del Gallo Editori D.G.E. Greenprinting srl
Via Dei Tornitori, 7 - 06049 Spoleto (PG)

Stampa

Laboratorio Tecnografico
Centro Ricerche ENEA Frascati
Numero chiuso nel mese di dicembre 2017

Registrazione

Tribunale Civile di Roma
Numero 148 del 19 aprile 2010 del registro - Stampa



38 Gestione rifiuti radioattivi biomedici, industriali e della ricerca

01 Editoriale

06 Presentazione di Alessandro Dodaro e Andrea Fianza

INTERVIEW

08 with Meera Venkatesh (IAEA)

FOCUS

10 Il contributo ENEA alle moderne sfide della fusione nucleare

14 L'esperienza di Sogin per il decommissioning della centrale nucleare del Garigliano

18 Il Progetto nazionale per la gestione dei rifiuti radioattivi

22 La security e le tecnologie nucleari

28 Sorgenti di neutroni in ENEA per la salute dell'uomo

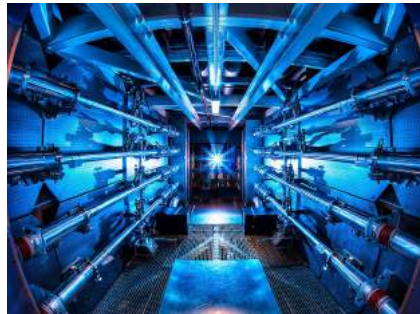
34 DTT, un tokamak per lo studio dei carichi termici dei reattori a fusione

38 Il Servizio Integrato per la gestione dei rifiuti radioattivi di origine non elettro-nucleare attraverso l'esperienza operativa di Nucleo

Sommario



52 Fusion Power Plants



68 Rossella Muroli (Legambiente) e Antonio Naviglio (Prof. di Impianti Nucleari)



78 Focus Group del Progetto COBRA sui beni culturali

QUADRO INTERNAZIONALE

- 44** The European In-Kind Contribution to ITER
- 52** Fusion Power Plants
- 58** The Thermonuclear Fusion Lesson
- 62** I rifiuti nucleari ad alta attività verso un deposito geologico condiviso?

PUNTO & CONTROPUNTO

- 68** Rossella Muroli (Legambiente) e Antonio Naviglio (Prof. di Impianti Nucleari)

SPAZIO APERTO

- 72** Progetto Compostino: monitoraggio e controllo del processo di compostaggio basati su Arduino
- 78** L'esperienza dei Focus Group nell'ambito del progetto COBRA

COSA SUCCEDDE IN CITTÀ

- 82** Orti urbani

Presentazione



di **Alessandro Dodaro e Andrea Fidanza**

La domanda che il Comitato di Redazione e lo stesso Direttore si sono fatti, prima di completare questo numero della Rivista, è se valeva la pena fare un numero dedicato al nucleare in Italia. Evidentemente la risposta è stata sì, confortati anche dalla positività della risposta sia dell'ing. Pizzuto, Direttore del Dipartimento Fusione Nucleare e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare dell'ENEA, sia dei tanti colleghi all'interno dell'Agenzia, che si occupano di nucleare.

Può sembrare strano pensare al nucleare senza trattare, o se vogliamo senza parlare, della produzione di energia e senza riferirsi alle tante polemiche che hanno accompagnato la storia del nucleare nel nostro Paese, da Chernobyl a Fukushima passando per Scanzano, che era il titolo di un libro dedicato a questa storia.

Crediamo che pochi in Italia sappiano di nucleare come noi dell'ENEA, che rispetto ad altri abbiamo un grande vantaggio: ci occupiamo di fusione, l'energia delle stelle, di diagnostica e terapia medica, di radiofarmaci, di *decommissioning* e di depositi per lo stoccaggio dei rifiuti radioattivi. E inoltre noi conosciamo i colleghi di Sogin e di Nucleco, società che affrontano questi temi giorno per giorno, tra molte difficoltà e molte incertezze, anche politiche.

Al di là di tutto ciò, sono temi che vanno affrontati senza timore, alcuni perché hanno a che fare con l'avanzamento della scienza, pensiamo alla fusione, alle applicazioni sanitarie e altri perché riguardano i temi della *security* finalizzata a prevenire un uso illecito di materiali radioattivi.

Ovviamente il numero sul nucleare non poteva non trattare del Divertor Tokamak Test (DTT), facility che l'Italia si propone di costruire per studiare i carichi termici dei reattori, oltre che di ITER, prototipo di reattore a fusione in corso di costruzione in Francia cui è dedicato gran parte della sezione internazionale della rivista, proprio per il peso che la fusione ha assunto nella ricerca sul nucleare.

Il tema sul nucleare si chiude con il nostro classico "Punto & Contropunto", dove due visioni molto differenti sono messe a confronto e si tratta in entrambi i casi di opinioni autorevolissime. Articoli con differente tematica sono invece presenti in Spazio Aperto, dove si parla di arte e di

compostaggio, argomenti molto diversi ma sempre all'ordine del giorno, per concludere infine con un contributo per la rubrica "Cosa succede in città" che affronta un fenomeno in grande espansione: gli orti urbani.

Siamo certi che il numero costituisca un valido contributo a favorire il dialogo e la conoscenza di un tema troppo spesso banalizzato o riportato solo per polemiche, eliminando dal dibattito gli elementi di pregiudizio culturale ancora pesantemente presenti sull'argomento.

Interview

Edited by Gaetano Borrelli



with **Meera Venkatesh**, *Director of Division of Physical and Chemical Sciences in the Department of Nuclear Applications, at the International Atomic Energy Agency (IAEA)*

When common people “think” about nuclear, the feeling is on energy production or “bomb” technology. De facto, scientists use a large amount of nuclear data for different research activities. How is the preservation of this fundamental knowledge handled, being an invaluable resource for nuclear science?

Yes; ‘Nuclear Data’ is the fundamental underpinning need for all the applications that involve nuclear reactions or ‘nuclear phenomena’. It is not only important to preserve the invaluable nuclear data, but it is also essential to continuously update and add new data to incorporate the recent research work done all through the world. And, while doing so, it is indeed necessary to validate and check the published data. Recognizing the important role of nuclear data for the nuclear community, the IAEA has been providing ‘Nuclear Data Services’ since more than 50 years. The Nuclear Data Section, through engagement of experts on different aspects of nuclear/atomic/molecular data development and assessment, provides a variety of databases to suit the needs of researchers from different fields of specialty. One may visit the nuclear data services page (<https://www.iaea.org/resources/databases/nuclear-data-services>) for more details. It may also be of interest to know that an App, “Isotope |Browser”, that can provide the properties of more than 4000 isotopes, suitable for i-phones as well as android devices, has been developed and can be freely downloaded (<http://play.google.com/store/apps>).

People often misconstrue nuclear applications as risky. The IAEA is attempting to raise awareness on the health benefits of many nuclear applica-

tions. How are nuclear applications used for human health and what are the future challenges?

Nuclear and radiation technologies have several applications in health-care. The most well-known and perhaps the oldest application is in treatment of cancer. The use of radiations from radioisotopes such as Cobalt-60 (known as teletherapy) or by placing radioactive material (such as Gold-198 wires or Iridium-192 sources) in contact with cancer lesions (known as brachytherapy) has been practiced successfully to treat localized cancers for several decades. The recent trend is to move from radioactivity-based teletherapy to use of x-rays or electron beams produced in linear accelerators instead of the gamma rays from Cobalt-60. In recent years, the use of energetic heavy ions such as protons or carbon ions prepared in particle accelerators for therapy is increasing. This field is generally known as ‘Radiation Therapy’.

Nuclear medicine is another branch of medicine which employs ‘Radiopharmaceuticals’ which are biomolecules labelled with radioisotopes. Radiopharmaceuticals, when administered, get distributed into the body through a biochemical path and are hence used to obtain information about internal organs or cancer lesions or functioning of organs, as well as for treatment of diseases such as cancer or hyperthyroidism. Radionuclides emitting radiation with high linear energy transfer are used for therapy while radiations with low linear energy transfer are used in diagnosis. The most well-known diagnostic radioisotopes in nuclear medicine are Technetium-99m and Fluorine-18, used in more than 40 million procedures all over the world. Apart from these, high energy radiations (either gamma rays or electron beams) are also used for medical ster-

ilization and irradiation of blood/tissues to make them suitable for transfusion.

The major challenge in using radioisotopes is the stable sustained availability of radioisotopes, as they cannot be stored and need to be continuously produced in reactors or particle accelerators.

In your opinion, can education and training in the nuclear field modify the risk perception of nuclear introducing a more complete vision of these technologies?

Yes; certainly education and awareness about nuclear technologies and their beneficial uses in making our life better, safer and comfortable, would make a difference. It is important for the society to know the benefits and also understand that every technology needs to be practiced in a safe and proper way. Every technology has associated risks and need to be handled properly so that they can be harnessed to our benefit.

The exploitation of fusion energy is one of the most ambitious challenges humankind is faced with. How important is international cooperation in this field?

Yes; harnessing fusion energy is a very ambitious goal and it is indeed extremely complex to practically mimic the sun on earth, albeit on a much smaller scale! The multiple challenges associated with the 'fusion energy harnessing' make it imperative that several highly talented and experienced researchers work towards the same goal in unison. In addition, the costs involved are very huge. Hence, in order to achieve success researchers around the world need to work together and share results and experiences to move forward. In other words, 'international cooperation' is vital and absolutely essential. This is why the IAEA works towards bringing the fusion community together and facilitating co-operation among them.

Il contributo ENEA alle moderne sfide della fusione nucleare

Imbrigliare l'energia delle stelle, ovvero ottenere una nuova fonte energetica praticamente illimitata e accettabile dal punto di vista ambientale, rappresenta una delle più grandi sfide scientifiche e tecnologiche ancora irrisolte. L'Italia è tra i pionieri nello sviluppo della fisica, tecnologia e ingegneria per la fusione e continua a svolgere, attraverso ENEA, un ruolo di primissimo piano nel complesso ambito europeo e internazionale delle attività R&S sulla fusione. Per il futuro, L'ENEA punta a consolidare le eccellenze maturate nel corso degli anni, perseguendol'obiettivo della commercializzazione dell'energia da fusione entro la seconda metà del secolo

DOI 10.12910/EAI2017-060

di **Antonio Botrugno** e **Giuseppe Mazzitelli**, ENEA

La fusione nucleare, il processo di trasformazione della massa in energia che alimenta il sole e le stelle, potrebbe soddisfare una delle esigenze fondamentali della civiltà moderna: abbondante produzione di energia elettrica con eccellenti caratteristiche di sicurezza e modesto impatto ambientale. La fusione termonucleare controllata presenta, infatti, notevoli vantaggi rispetto ad altre fonti di approvvigionamento energetico: una produzione sostanzialmente illimitata non soggetta a variazioni stagionali, nessuna emissione di gas a

effetto serra, nessuna produzione di scorie radioattive a lunga vita media, operazioni di reattore a sicurezza intrinseca e nessun rischio di proliferazione nucleare. Ciò rende l'energia da fusione un'opzione estremamente attraente per future strategie energetiche a livello locale e globale.

Le sfide della fusione nucleare

Controllare in un reattore a fusione il meccanismo fisico che alimenta le stelle per produrre energia elettrica rappresenta una delle più grandi sfide scientifiche e tecnologiche anco-

ra irrisolte. Una proficua e continua attività di R&S condotta nei centri di ricerca e nelle università di tutto il mondo ha garantito negli anni un costante progresso in questo ambito aprendo la strada alla possibile commercializzazione dell'energia da fusione nell'arco di questo secolo. La linea scientifica risultata più promettente è caratterizzata da reattori di tipo tokamak di grandi dimensioni. In un tokamak, una miscela di gas di deuterio e trizio è confinata mediante campi magnetici in una camera da vuoto di forma toroidale e poi riscaldata fino a 100-150 milioni di gradi

in modo da avvicinarsi quanto più possibile alla condizione di ignizione di un plasma termonucleare (vedi *box di approfondimento*).

Tuttavia esistono ancora alcune tecnologie da validare, come il mantenimento di un plasma deuterio-trizio stabile ai guadagni di potenza tipici di un reattore, l'utilizzo di materiali in grado di sopportare i carichi termici e di particelle dei componenti affacciati al plasma, la produzione di trizio per garantire l'autosufficienza del ciclo del combustibile da fusione, l'utilizzo di materiali strutturali e funzionali resistenti agli alti flussi neutronici e in grado di minimizzare l'attivazione neutronica per tempi paragonabili alla vita di un reattore e la possibilità di operare il reattore in maniera stazionaria.

Alcune delle tecnologie chiave necessarie per la realizzazione di un reattore a fusione saranno testate con ITER, un progetto da oltre 20 miliardi di euro con sette membri: Cina, India, Giappone, Corea del Sud, Unione Europea (con l'aggiunta della Svizzera), Federazione Russa e Stati Uniti. ITER è in fase di costruzione a Cadarache, nel Sud della Francia, ed è il tokamak più avanzato e più grande al mondo. ITER è progettato per ottenere un guadagno di potenza da fusione Q (il rapporto fra la potenza prodotta e la potenza depositata nel plasma per mantenerlo in condizioni fusionistiche) di almeno 10 e produrre circa 500 MW di potenza termica. Il passo successivo sarà il reattore dimostrativo DEMO previsto nel 2050, una vera e propria centrale nucleare a fusione che dimostrerà la commercializzazione dell'energia fornendo energia elettrica alla rete e aprendo la via allo sfruttamento dell'energia da fusione a scopi civili nella seconda metà del secolo. Esistono anche ipotesi alter-



native alla realizzazione di DEMO come quella di un esperimento pilota, un reattore quanto più piccolo possibile e direttamente scalabile ad una produzione di energia tipica di un reattore commerciale.

Parallelamente ai grandi esperimenti in corso e programmati che definiscono una vera e propria *roadmap* verso lo sfruttamento dell'energia da fusione, ci sono altri esperimenti internazionali che supportano la viabilità del programma come JT-60SA e IFMIF inquadriati nel Broader Approach (il programma di accompagnamento europeo in fisica e tecnologia stabilito tra Europa e Giappone). Esistono, inoltre, molti altri progetti nazionali destinati sia allo studio della fisica che allo sviluppo di tecnologie più tipiche del reattore le cui attività riguardano un ampio ambito di collaborazioni internazionali, come ad esempio i tokamak JET (Joint European Torus, UK), ASDEX-Upgrade (Germania), TCV (Svizzera), DIII (USA), KSTAR (Corea del Sud), EAST (Cina).

Il ruolo dell'Italia

In questo variegato contesto internazionale, è importante rimarcare che

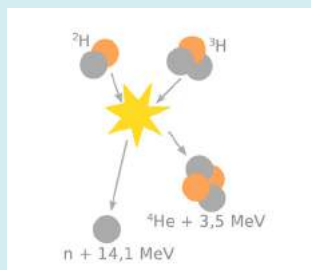
l'Italia è tra i pionieri dello sviluppo della fusione, avendo svolto negli anni una proficua attività R&S nel campo della fisica, tecnologia e ingegneria per la fusione. L'Italia aderì all'EURATOM nel 1960 tramite il Consiglio Nazionale Ricerche Nucleari che è poi divenuto ENEA, ed è stata tra i primi a realizzare nei suoi laboratori grandi impianti per lo studio dei plasmi a confinamento magnetico come il Frascati Tokamak (FT) nel 1971 e il Frascati Tokamak Upgrade (FTU) progettato negli anni 80 e ancora in funzione. FT e FTU sono macchine tokamak ad alto campo magnetico che hanno fatto luce su importanti meccanismi dei plasmi ad alta densità come ad esempio i fenomeni collettivi e le instabilità magnetodinamiche, sui sistemi di riscaldamento addizionale mediante onde elettromagnetiche ad alte frequenze (qualche centinaia di GHz), sull'uso di tecniche diagnostiche per il controllo e lo studio dei plasmi e anche sullo sviluppo dei materiali affacciati al plasma come ad esempio i metalli liquidi.

Attualmente, l'Italia è tra i partner principali di EUROfusion, l'agenzia europea che gestisce il programma europeo sulla fusione, e di Fusion for Energy l'agenzia che svolge il ruolo

Come avviene la fusione nucleare?

La fusione è il processo che alimenta il sole e le stelle. La fusione è una reazione nucleare in cui due nuclei leggeri, grazie alle forze nucleari forti, si fondono per dare origine a un nucleo più pesante, la cui massa è minore della somma delle masse dei nuclei di partenza. Si ha così un difetto di massa (Δm) corrispondente a un rilascio di energia, in base alla nota formula di equivalenza tra massa e energia $E = \Delta m \cdot c^2$.

La fusione termonucleare controllata che avviene nei laboratori sfrutta due isotopi pesanti dell'idrogeno: il deuterio (^2H) e il trizio (^3H). Tra le tante possibili reazioni di fusione, la reazione deuterio-trizio ha la più grande sezione d'urto (cioè la probabilità di una reazione) e il più grande valore Q (cioè l'energia rilasciata durante la reazione). Produce una particella α (o nucleo di ^4He), un neutrone e rilascia 17,6 MeV di energia sotto forma di energia cinetica dei prodotti (3,5 MeV alla particella α e 14,1 MeV al neutrone). Il trizio non esiste in natura perché decade con breve vita media, deve essere prodotto dal reattore stesso a partire dal litio (Li): quindi i combustibili primari di un reattore a fusione sono ^2H e Li.



Schema della reazione di fusione deuterio-trizio

Per ottenere un guadagno di energia proprio di un reattore di potenza sono necessarie tre condizioni principali:

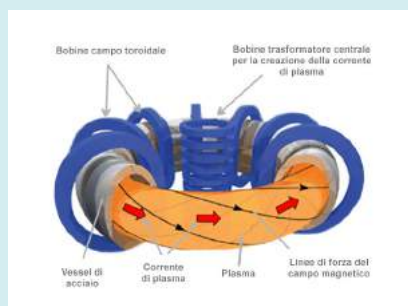
- La **temperatura** deve essere abbastanza alta ($\approx 100\text{-}150$ milioni di gradi) per consentire agli ioni di deuterio e trizio di avere energia cinetica sufficiente a superare la repulsione

coulombiana e fondersi tra loro.

- Gli ioni devono essere confinati ad alta **densità** ($\approx 10^{20}$ particelle/ m^3) per ottenere un'adeguata quantità di reazione di fusione.
- Gli ioni devono rimanere confinati ad alta temperatura con un **tempo di confinamento** abbastanza lungo da bilanciare le perdite energetiche e il raffreddamento.

Per riprodurre queste condizioni, la tecnologia basata sui reattori a confinamento magnetico si è rivelata la più promettente. Gli ioni e gli elettroni in quanto particelle cariche non possono attraversare facilmente un campo magnetico, quindi appropriate configurazioni magnetiche possono mantenere le particelle a un volume determinato riducendo al minimo le perdite. Il tokamak è lo schema di confinamento magnetico più sviluppato dalla comunità scientifica. Si tratta di un contenitore di forma toroidale con un campo magnetico elicoidale che si realizza grazie alla combinazione dei campi magnetici generati da numerose bobine e dalla corrente di plasma.

A causa di temperature estremamente elevate in un tokamak si verifica la transizione di materia allo stato del plasma, chiamato anche "il quarto stato della materia". Il plasma è costituito da un gas completamente ionizzato o parzialmente ionizzato, contenente ioni, elettroni e atomi neutri. Attualmente, la fusione termonucleare è anche la principale area di ricerca nel campo della fisica del plasma.



Schema di una configurazione magnetica di tipo Tokamak

di partner della ITER International Organization per conto dell'Europa. Tutte le attività italiane sulla fusione sono coordinate da ENEA e condotte insieme al Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), l'Istituto Na-

zionale di Fisica Nucleare (INFN), il Consorzio di Ricerca per l'Energia, l'Automazione e le Tecnologie dell'Elettromagnetismo (CREATE) e alcuni tra i più prestigiosi istituti universitari italiani. Ciò garantisce

un ampio spettro di competenze a disposizione e lo svolgimento di attività in grado di fornire contributi rilevanti sia ai principali programmi di ricerca internazionale quali ITER, DEMO e Broader Approach, sia ai



numerosi progetti nazionali basati su accordi bilaterali in vari ambiti del programma fusione.

L'ENEA svolge un ruolo di primissimo piano nel complesso cammino della ricerca nel campo della fusione termonucleare. Le principali attività sulla fusione si svolgono nel Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare, con le sue sedi nei Centri di Ricerca di Frascati, Brasimone, Bologna-Faenza e Casaccia. L'ENEA sviluppa le attività di ricerca scientifica e tecnologica in settori chiave per la realizzazione dell'energia da fusione e con laboratori dedicati a studi specifici. Tra questi, vale la pena citare FTU che supporta lo sviluppo di materiali e componenti affacciati al plasma, lo studio di instabilità del plasma e i metodi di prevenzione e mitigazione degli effetti, lo sviluppo di sistemi diagnostici per il plasma termonucleare. Altra componente fondamentale della ricerca sulla fusione è il Frascati Neutron Generator (FNG), entrato in funzione nel 1992, che grazie alle reazioni deuterio-trizio produce un alto flusso di neutroni a 14 MeV permettendo lo studio del danneggiamento neutronico di materiali strutturali e funzionali per il reattore, lo sviluppo dei database nucleari relativi alle reazioni tra neutroni e i materiali proposti e funziona da complemento per lo sviluppo delle diagnostiche neutroniche. Va citato anche il laboratorio dedicato a studi di superconduttività: il funzionamento di un tokamak si basa su numerosi avvolgimenti elettrici per la produzione dei campi magnetici che confinano e guidano il plasma; nei materiali su-

perconduttori la corrente scorre negli avvolgimenti con resistenza elettrica nulla e ciò permette di generare alti campi magnetici minimizzando la dissipazione termica, garantendo il funzionamento in continua e riducendo i costi di operazione. Inoltre, è condotta un'intensa attività anche nel campo della manutenzione remota, essenziale elemento per la gestione di un impianto nucleare quale un reattore a fusione, e nel campo dello sviluppo di membrane per la separazione in fase gassosa dell'idrogeno e dei suoi isotopi: ciò permette di recuperare il trizio ed eventualmente riutilizzarlo nel ciclo del combustibile. Oltre alle attività svolte nei propri laboratori e al coordinamento delle attività nazionali, l'ENEA partecipa alle campagne sperimentali di altri tokamak come il JET, ASDEX-Upgrade, EAST ed altri.

Nel corso degli anni, l'ENEA ha anche incentivato e supportato il trasferimento tecnologico nel settore fusione in collaborazione con l'industria; le attività sulla fusione hanno originato oltre 50 brevetti negli ultimi 20 anni, con ricadute significative per lo sviluppo e la competitività delle industrie nazionali producendo innovazione e know-how di alto valore tecnologico in settori strategici. Nella realizzazione di ITER, infatti, sono coinvolte molte industrie italiane che si sono aggiudicate commesse per un valore di oltre un miliardo di euro all'interno delle gare per le forniture europee di ITER, ad esempio, per le bobine superconduttrici e la camera da vuoto. Fra queste industrie vi sono Ansaldo Nucleare, ASG Supercon-

ductors, SIMIC, Mangiarotti, Walter Tosto, Delta-ti Impianti, OCEM Energy Technology, Angelantoni Test Technologies, Zanon, CECOM e altre.

Uno sguardo al futuro

Il successo di ITER è l'elemento fondamentale verso la futura realizzazione di un reattore commerciale per la produzione di energia da fusione, proiettando l'umanità verso una rivoluzione energetica, una nuova era per la produzione di energia che permetterà di ridurre drasticamente l'uso dei combustibili fossili. L'ENEA svolge un ruolo di primissimo piano in questo complesso cammino della ricerca nel campo della fusione termonucleare. L'obiettivo per il prossimo futuro è di fornire un contributo chiave per rendere l'energia da fusione una realtà nel più breve tempo possibile. L'ENEA punta a consolidare quelle eccellenze acquisite nel corso degli anni e già riconosciute a livello internazionale, per questo ha recentemente proposto la realizzazione del Divertor Tokamak Test (DTT) Facility (vedi, nel seguito l'articolo "*DTT, un tokamak per lo studio dei carichi termici dei reattori a fusione*"), un grande e ambizioso progetto che permette di riprodurre alcune delle caratteristiche del bordo plasma di DEMO e di fare luce sia sulla problematica dei materiali in grado di sopportare alti carichi termici, sia sul funzionamento del divertore, un componente essenziale per i futuri reattori a fusione.

L'esperienza di Sogin per il decommissioning della centrale nucleare del Garigliano

Le centrali nucleari di prima e seconda generazione erano state progettate senza pensare che al termine del loro ciclo di vita si sarebbero dovute smantellare. Per questa ragione il decommissioning nucleare richiede professionalità, competenze distintive e tecnologia innovativa. L'Italia, con Sogin, è impegnata in questa sfida su otto siti: le quattro centrali di Trino (Vercelli), Caorso (Piacenza), Latina e Garigliano (Caserta) e gli impianti del ciclo del combustibile nucleare Eurex di Saluggia (Vercelli), FN di Bosco Marengo (Alessandria), Opec e Ipu di Casaccia (Roma) e Itrec di Rotondella (Matera). Nella centrale del Garigliano è stato demolito il camino, alto quasi 100 metri, dopo averlo decontaminato al suo interno. Un progetto tutto made in Italy che dimostra che l'Italia in questo campo ha maturato un know-how spendibile anche all'estero

DOI 10.12910/EAI2017-061

di **Severino Alfieri**, Direttore Disattivazione Centrali, Sogin SpA

Il *decommissioning* (smantellamento) di un impianto nucleare è l'ultima fase del suo ciclo di vita. Questa attività si concretizza in una serie di operazioni che, continuando a garantire il mantenimento in sicurezza, riguardano, in termini generali:

- la progettazione dei lavori;
- l'allontanamento del combustibile

nucleare irraggiato per il riprocessamento;

- la decontaminazione;
- lo smantellamento delle installazioni nucleari e la gestione e messa in sicurezza dei rifiuti radioattivi.

Nel nostro Paese tutte queste attività sono svolte da Sogin, la Società pubblica che ha proprio la responsabilità di smantellare gli impianti nucleari

e di gestire i rifiuti radioattivi. Oltre alle quattro centrali nucleari italiane di Trino (Vercelli), Caorso (Piacenza), Latina e Garigliano (Caserta) e all'impianto FN di Bosco Marengo (Alessandria), Sogin gestisce il *decommissioning* degli ex impianti di ricerca Enea Eurex di Saluggia (Vercelli), Opec e Ipu di Casaccia (Roma) e Itrec di Rotondella (Matera). L'obiettivo del *decommissioning* è ri-

portare le otto aree che oggi ospitano gli impianti a *green field*, cioè a una condizione priva di vincoli radiologici alla quale è possibile giungere non solo con lo smantellamento di tutte le strutture (fase di *brown field*) ma anche con il graduale conferimento dei rifiuti radioattivi al Deposito Nazionale, una volta disponibile. Il Deposito Nazionale sarà infatti un'infrastruttura ambientale di superficie dove saranno messi in sicurezza i rifiuti radioattivi prodotti, dal progresso esercizio e dallo smantellamento delle centrali e degli impianti nucleari, dalle attività di medicina nucleare, industriali e di ricerca.

Sogin è impegnata, quindi, nella chiusura del ciclo elettronucleare italiano. Un'operazione complessa e una grande sfida soprattutto ingegneristica in quanto la Società sta smantellando contemporaneamente centrali nucleari tutte diverse fra loro e che, seppur tutte costruite tra gli anni Cinquanta e Settanta quando l'Italia era attiva nel settore, non erano state progettate per il loro *decommis-*

sioning. Ciò si traduce nella costante ricerca di soluzioni quasi sempre di natura prototipale e che, peraltro, non sono replicabili in scala.

La centrale del Garigliano

Una delle centrali in *decommissioning* si trova al confine tra Lazio e Campania: la centrale nucleare del Garigliano. Costruita in quattro anni (1959–1963) dalla SENN, Società Elettro-nucleare Nazionale, su progetto dell'ingegnere Riccardo Morandi, la centrale appartiene alla prima generazione di impianti nucleari con reattore BWR (Boiling Water Reactor) per una potenza di produzione elettrica di 160 MWe. Entrata in funzione nell'aprile del 1964, ha complessivamente prodotto 12,5 miliardi di kWh di energia elettrica.

Sogin ha avviato il *decommissioning* della centrale campana nel 2000 che è stata la seconda delle quattro centrali nucleari italiane, dopo quella di Trino Vercellese, a ottenere nel settembre 2012 il Decreto di Disat-

tivazione, approvato dal Ministero dello Sviluppo Economico su parere dell'Autorità di sicurezza nucleare (ISPRA) e delle altre Istituzioni competenti.

Dopo il fermo dell'impianto si è proceduto all'allontanamento degli elementi di combustibile presenti in centrale, al drenaggio di tutti i circuiti idraulici del reattore e allo svuotamento della piscina di stoccaggio del combustibile, nella quale il combustibile era custodito.

Sono stati realizzati i laboratori chimici freddo e caldo ed è stato rimosso l'amianto dall'edificio turbina e dall'edificio reattore.

Sono stati condizionati in malta cementizia i rifiuti radioattivi di bassa e media attività prodotti durante l'esercizio dell'impianto

Le altre principali attività finora concluse riguardano poi la bonifica della trincea 2 e 3, mentre è in corso la bonifica della trincea 1. Negli anni di esercizio dell'impianto nelle trincee furono interrati, come consentivano allora gli standard internazionali e la normativa di riferimento, i rifiuti radioattivi di attività molto bassa. È stato ultimato il nuovo impianto elettrico, in vista delle prossime attività, ed è stato ripristinato il rivestimento protettivo esterno dell'edificio reattore, nell'ambito delle predisposizioni per lo smantellamento dei componenti interni e delle prescrizioni per garantirne integrità. Lo scorso anno è terminata l'attività di ripristino del locale officina calda, dove si effettuano le lavorazioni sui componenti radioattivi e sono stati effettuati i collaudi per la sua entrata in esercizio.

Sono in corso i lavori di smantellamento del vecchio sistema di trattamento dei reflui liquidi radioattivi dell'impianto (*radwaste*), propedeutici alla realizzazione di un nuovo



Fig. 1 La centrale nucleare del Garigliano prima della demolizione del camino

impianto per il quale si è già conclusa la progettazione. Sogin sta, inoltre, portando avanti le attività per lo smantellamento della turbina, che, con le sue 1.600 tonnellate, è il più grande componente del ciclo termico dell'impianto. Di recente è stato aperto il turboalternatore ed estratto il rotore, per un peso di circa 100 tonnellate.

Per quanto riguarda la gestione dei rifiuti radioattivi sia pregressi che prodotti dal *decommissioning*, nel sito campano sono presenti due depositi temporanei: il D1, di recente realizzazione, e l'edificio che ospitava l'impianto diesel d'emergenza, che è stato ristrutturato e adeguato.

Tutte le operazioni che Sogin svolge sono autorizzate e vigilate dai diversi Enti, nazionali e locali, tra i quali l'ISPRA e l'ARPA Campania. Nel sito del Garigliano è attiva, sin dagli anni della sua costruzione, una rete di sorveglianza radiologica ambientale che monitora costantemente le matrici ambientali del territorio: la qualità dell'aria, del terreno, delle acque superficiali e sotterranee, dei prodotti ittici del Garigliano e del vicino litorale tirrenico, nonché dei principali prodotti agro-alimentari del territorio (latte, frutta e verdura). I risultati dei monitoraggi sono inviati annualmente all'Autorità di controllo Ispra e resi pubblici. La rete è stata integrata per avviare il programma di monitoraggio convenzionale, in linea con quanto previsto dal Decreto di compatibilità ambientale (VIA).

Sogin, attraverso il portale cartografico "RE.MO. - REte di MONitoraggio" accessibile dal sito www.sogin.it, rende disponibili a tutti gli *stakeholder* i dati sul monitoraggio ambientale, convenzionale e radiologico, del sito del Garigliano, nonché informa-

zioni sull'andamento dei lavori di *decommissioning*. Il portale RE.MO. si aggiunge alle azioni e agli strumenti che adotta Sogin per favorire l'informazione e la trasparenza sulle proprie attività, rafforzando il rapporto con gli *stakeholder* e il dialogo con il territorio.

"Addio" al camino della centrale

Lo "skyline" della centrale campana è stato finora caratterizzato dal camino, una struttura tronco-conica



Fig. 2 Lo skyline della centrale del Garigliano prima e dopo lo smantellamento del camino

in cemento armato alta 95 metri, con un diametro che varia dai circa 5 metri della base ai circa 2 metri della sommità.

Il camino, posizionato accanto all'edificio reattore, da sempre ha svolto la funzione di convogliare in quota, e in maniera controllata, lo scarico in atmosfera degli effluenti gassosi provenienti dagli edifici a potenziale rischio di contaminazione radioattiva oggetto di *decommissioning* quali turbina, reattore e *radwaste*.

Seppur essenziale per le attività di *decommissioning* in corso, il camino non garantiva più la massima sicu-

rezza essendo stato progettato e costruito secondo criteri di resistenza in vigore negli anni Sessanta. Tale dato è ancor più rilevante se si considera che l'area che ospita la centrale nucleare è stata dichiarata a rischio sismico a seguito del terremoto dell'Irpinia del 1980.

Escluse le opzioni di un adeguamento strutturale, Sogin ha deciso di procedere alla demolizione del camino in elevazione e, al termine, di realizzare un nuovo camino in acciaio alto 34 metri. Un'altezza quasi

tre volte inferiore a quella dell'attuale, sufficiente per lo scarico degli effluenti aeriformi per le prossime operazioni di *decommissioning*.

Le attività finalizzate allo smantellamento del camino sono state avviate nel marzo 2014 per consentire l'apertura del cantiere e la demolizione come struttura convenzionale. I lavori sono terminati il 14 novembre 2017.

In una prima fase sono stati svolti interventi propedeutici quali: il consolidamento della struttura; l'impermeabilizzazione delle aree; la realizzazione della vasca di prima pioggia.



Sono stati, inoltre, eseguiti i collaudi dei sistemi e dei macchinari attraverso un *mock-up* del camino in cemento armato alto 12 metri, costruito in un apposito punto esterno al sito.

Successivamente Sogin ha decontaminato, tramite scarifica, le pareti interne del camino. Per tale operazione è stato utilizzato un robot antropomorfo di tecnologia italiana, appositamente progettato e costruito, che è stato movimentato in remoto all'interno del cono. Compito del robot è stato, quindi, decontaminare la superficie interna del camino, rimuovendo progressivamente strati sottili di calcestruzzo, debolmente contaminati, dalle pareti interne per uno spessore massimo di circa 1 centimetro.

Sulla sommità del camino è stata posta una piattaforma che ha ospitato l'apparecchiatura per la movimentazione del robot. Grazie a specifiche serrande di regolazione, la piattaforma ha anche consentito la gestione del flusso d'aria evitando la dispersione all'esterno di detriti e polveri durante i lavori. Ciò ha garantito la massima sicurezza per la popolazione e l'assenza di impatti sull'ambiente.

La scarifica ha permesso di eliminare tutta la radioattività presente nella struttura. A decontaminazione avvenuta, Sogin ha proceduto alla demolizione come struttura convenzionale. Il via ai lavori è stato dato il 21 agosto 2017 e in pochi mesi la struttura è stata completamente demolita.

Sono stati diversi i sistemi di demolizione esaminati, confrontati e testati in galleria del vento, su due modelli



Fig. 3 L'avvio della demolizione del camino della centrale del Garigliano con la tecnica della frantumazione controllata

in scala 1:12 e 1:80, per valutare il comportamento statico e dinamico del camino. Tali test hanno consentito di massimizzare il livello di sicurezza per i lavoratori e di evitare eventuali conseguenze alle strutture limitrofe.

La tecnica adottata è stata la frantumazione controllata che ha previsto l'installazione di una piattaforma sulla sommità, ancorata all'esterno nel terreno, per sostenere gli appositi macchinari che hanno smantellato gradualmente il camino, con la caduta dei materiali di risulta al suo interno. I detriti sono stati rimossi periodicamente per evitarne l'accumulo alla base. In totale sono state prodotte 830 tonnellate di materiale, di cui 800 di cemento e 30 di metallo. Il materiale non rilasciabile prove-

niente dalla scarifica, pari a 7 metri cubi, è stato invece stoccato in fusti nel deposito temporaneo del sito campano.

Durante tutte le fasi di smantellamento, nel rispetto delle prescrizioni sia del Decreto VIA sia dell'Autorità di controllo ISPRA, è stata messa in esercizio una rete di monitoraggio ambientale per il controllo di tutte le componenti ambientali sia convenzionali che radiologiche.

Con la demolizione del camino si conclude un progetto rilevante nel programma di smantellamento della centrale del Garigliano, caratterizzato da soluzioni progettuali e tecnologiche tutte italiane che confermano l'eccellenza del *know-how* di Sogin nel *decommissioning* nucleare.

Il Progetto nazionale per la gestione dei rifiuti radioattivi

Anche l'Italia, al pari degli altri Paesi dell'Unione Europea, è chiamata a dotarsi di un deposito centralizzato per la sistemazione in sicurezza dei rifiuti radioattivi. Al Deposito Nazionale sarà affiancato il Parco Tecnologico, un centro di ricerca applicata e formazione nel campo del decommissioning nucleare e della gestione integrata del ciclo di vita dei rifiuti radioattivi

DOI 10.12910/EAI2017-062

di **Fabio Chiaravalli**, *Direttore Deposito Nazionale e Parco Tecnologico, Sogin SpA*

Sogin è la Società pubblica responsabile del mantenimento in sicurezza e del *decommissioning* degli impianti nucleari italiani e della gestione dei rifiuti radioattivi. È interamente partecipata dal Ministero dell'Economia e delle Finanze e opera in base agli indirizzi strategici del Governo italiano.

Operativa dal 2001, diventa Gruppo nel 2004, con l'acquisizione del 60% del capitale sociale di Nucleco SpA, l'operatore nazionale qualificato per la raccolta, il trattamento, il condizionamento e lo stoccaggio temporaneo dei rifiuti e delle sorgenti radioattive provenienti dalle attività di medicina nucleare, oltre che di ricerca scientifica e tecnologica.

Il Decreto Legislativo n. 31 del 2010 ha affidato a Sogin il compito di localizzare, progettare, realizzare e gestire il Deposito Nazionale e il Parco Tecnologico, un'infrastruttura ambientale di superficie, dove sistemare in sicurezza i rifiuti radioattivi italiani.

La realizzazione del Deposito Nazionale consentirà di portare a compimento il *decommissioning* degli impianti nucleari italiani - ossia quattro centrali di potenza, ubicate a Caorso (Piacenza), Garigliano (Caserta), Latina, Trino (Vercelli) e cinque impianti del ciclo del combustibile, ubicati in quattro siti: Bosco Marengo (Alessandria), due a Casaccia (Roma), Saluggia (Vercelli), Rotondella (Matera), - nonché di gestire

i rifiuti radioattivi, compresi quelli generati dalle attività di medicina nucleare, industriali e di ricerca.

Il Deposito Nazionale consentirà infatti, in armonia con quanto già avviene negli altri Stati membri dell'Unione Europea, la sistemazione definitiva dei rifiuti radioattivi a bassa attività, per un volume attorno ai 75.000 metri cubi e lo stoccaggio temporaneo in sicurezza dei rifiuti radioattivi a media e alta attività, per un volume attorno ai 15.000 metri cubi, in attesa della loro allocazione definitiva in un deposito geologico. Si stima che l'insieme dei rifiuti radioattivi di cui sopra deriverà per circa il 60% da origine energetica (produzione di energia elettrica da fonte nucleare) e per circa il 40% da

altre origini non energetiche (medicina nucleare diagnostica e terapeutica, ricerca, industria).

Il Deposito Nazionale italiano sarà altresì parte integrante del Parco Tecnologico, un centro di ricerca applicata e formazione nel campo del *decommissioning* nucleare e della gestione dei rifiuti radioattivi.

Pertanto, su mandato del Decreto Legislativo n. 31 del 2010, le attività di localizzazione del Deposito Nazionale, in capo a Sogin, hanno avuto formale inizio il 4 giugno 2014, data in cui ISPRA ha pubblicato la Guida Tecnica n. 29, dove sono definiti i criteri per la localizzazione di un impianto di smaltimento superficiale di rifiuti

radioattivi a bassa e media attività. Essenzialmente si tratta di 15 criteri di “esclusione”, ossia per escludere le aree del territorio nazionale le cui caratteristiche non permettano di garantire piena rispondenza ai requisiti di sicurezza, nonché di 13 criteri di approfondimento, atti allo scopo di valutare più in dettaglio le aree individuate a seguito dell’applicazione dei criteri di esclusione.

La proposta di Carta Nazionale delle Aree Potenzialmente Idonee (CNA-PI) è stata quindi elaborata e consegnata da Sogin a ISPRA il 2 gennaio del 2015, per le previste attività di verifica e validazione rispetto all’applicazione dei criteri ex Guida Tecnica n. 29; attività effettuate e terminate

nel luglio 2015 con la trasmissione, da parte di ISPRA ai Ministeri competenti, dell’elaborato cartografico validato, insieme a tutta la documentazione tecnica relativa alle analisi messe in opera da Sogin.

Quanto sopra in attesa del nulla osta ministeriale, verso Sogin, alla pubblicazione della CNA-PI, dando così inizio alla Consultazione Pubblica e, successivamente, al Seminario Nazionale, primi passi dell’iter procedurale di legge, per giungere all’individuazione trasparente e condivisa del sito per il Deposito Nazionale e quindi alla sua costruzione e gestione.

Nelle more di tale articolazione temporale si è nel frattempo evi-



L'interno di un deposito temporaneo dei rifiuti radioattivi

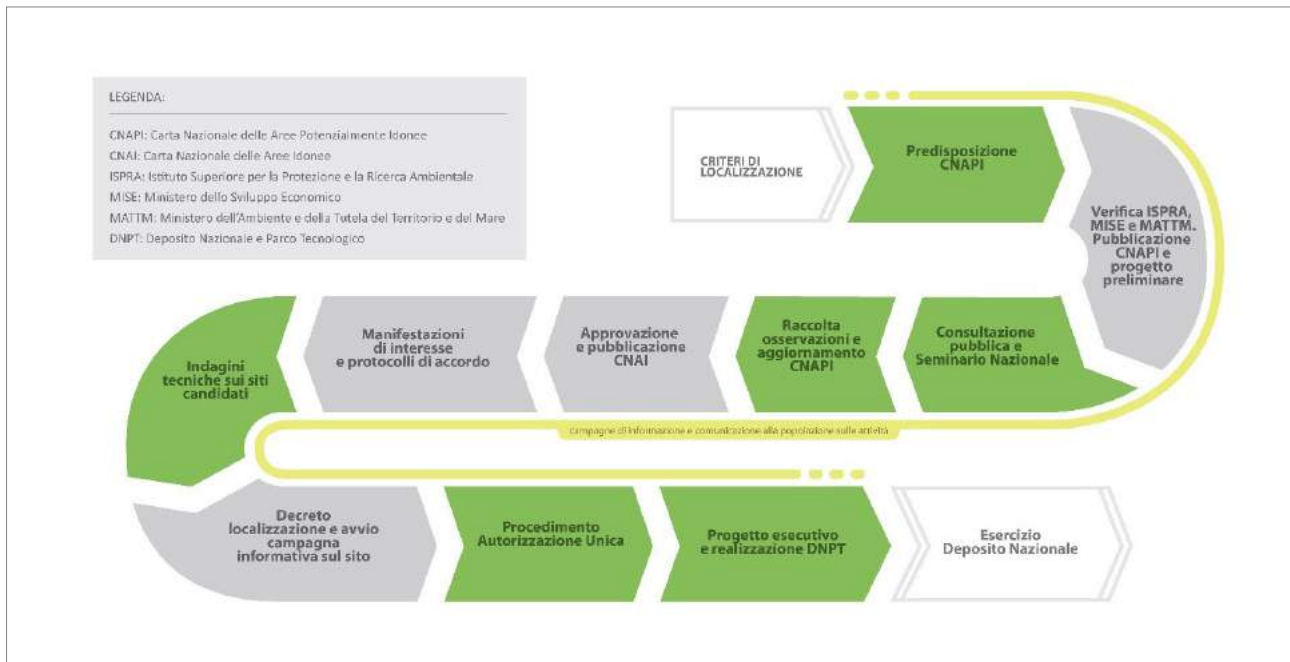


Fig. 1 Iter di localizzazione del Deposito Nazionale

denziata la ormai inderogabile necessità per l'Italia di ottemperare alle richieste, formulate dall'Unione Europea agli Stati membri, di produrre il "Programma Nazionale per la gestione del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi", ai sensi del Decreto Legislativo n. 45/2014 di recepimento della Direttiva 2011/70/EURATOM. Tale Direttiva istituisce un quadro comunitario per la gestione responsabile e sicura del combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi.

Allo stato attuale il Programma citato, il cardine del quale è il Deposito Nazionale, risulta oggetto di procedura VAS-Valutazione Ambientale Strategica e, a tale proposito, si fa riferimento alle dichiarazioni rilasciate dal Ministro dello Sviluppo Economico Carlo Calenda in occasione dell'audizione del 27 giugno 2017 presso la Commissione Bicamerale Ecorifuti:

"Gli esiti della consultazione sul

Programma Nazionale previsti per il terzo trimestre di quest'anno costituiranno la base per proseguire nell'identificazione sul territorio nazionale dell'area potenzialmente idonea a sistemare definitivamente

i rifiuti radioattivi. Come già menzionato, a valle della consultazione si chiuderà il processo di VAS entro il quarto trimestre del 2017 e sarà adottato definitivamente il Programma, con Decreto del Presiden-



Fig. 2 Deposito di superficie francese di La Manche per 500 mila metri cubi

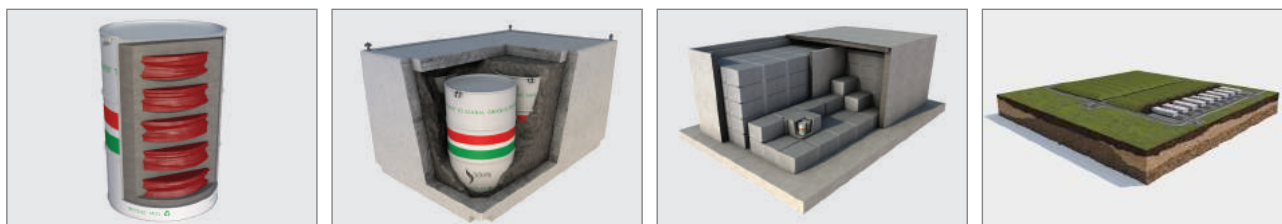


Fig. 3 Schema delle quattro barriere previste per il deposito: da sinistra a destra il manufatto, il modulo, la cella, la copertura multistrato per le celle

te del Consiglio, al più tardi entro il primo trimestre del 2018. La pubblicazione della proposta di CNAPI a ospitare il Deposito Nazionale, in sequenza rispetto alla finalizzazione del processo di VAS, darà ai cittadini la possibilità di disporre di tutte le informazioni utili a meglio comprendere e valutare la strategia nazionale”.

Il progetto per il deposito definitivo dei rifiuti radioattivi a bassa attività, in armonia con le migliori esperienze internazionali pregresse, si baserà sul concetto delle barriere multiple di protezione, allo scopo di permettere alla radioattività, caratterizzante i rifiuti stessi, di decadere progressivamente, isolata dall'ambiente, fino a livelli le cui dosi derivanti non possano nuocere alla salute della popolazione.

Essenzialmente si tratta di quattro barriere:

- la prima barriera è il manufatto. I rifiuti radioattivi, condizionati

con matrice cementizia apposta all'interno di contenitori metallici, vengono così trasferiti al Deposito Nazionale, nel rispetto di specifici criteri di conferibilità;

- la seconda barriera è il modulo. I manufatti, una volta arrivati al Deposito Nazionale, vengono inseriti e cementati in moduli di calcestruzzo speciale (3x2x1,7 metri), progettati per resistere almeno 350 anni;
- la terza barriera è la cella. In ogni cella di cemento armato (27x15,5x10 metri), anch'essa progettata per resistere almeno 350 anni, verranno inseriti 240 moduli;
- la quarta barriera è infine la copertura multistrato delle celle (circa 90) che una volta riempite verranno sigillate e ricoperte con più strati di materiale terroso, poi inerbite, per prevenire e minimizzare le infiltrazioni di acqua meteorica.

La garanzia di isolamento comple-

to dei rifiuti dalla biosfera verrà ulteriormente assicurato mediante il monitoraggio del sistema di captazione di eventuali infiltrazioni, posizionato in continuo al di sotto delle celle.

Occorre in ogni caso considerare che il sito su cui sorgerà il Deposito Nazionale sarà caratterizzato dal rispetto di tutti i criteri di sicurezza oggetto della Guida Tecnica n. 29 di ISPRA.

Infine, in attesa della disponibilità di un deposito geologico per la loro allocazione definitiva e in coerenza con quanto adottato a livello europeo, i rifiuti radioattivi ad alta attività, comprensivi del combustibile irraggiato e dei prodotti derivanti dal riprocessamento, verranno trasportati e stoccati temporaneamente nel Deposito Nazionale in contenitori ad alta integrità, idonei sia per il trasporto, sia per la sistemazione definitiva, a garanzia dei massimi standard internazionali di sicurezza.

La security e le tecnologie nucleari

Il quadro geopolitico internazionale ha acuito le preoccupazioni per un uso illecito di materiali radioattivi da parte di gruppi terroristici. Un'efficace opera di prevenzione e contrasto a questa minaccia non può prescindere dall'utilizzo delle più avanzate tecnologie da parte delle autorità preposte alla sorveglianza, viste in questo caso come utenti finali delle tecnologie stesse. L'ENEA nel corso degli anni si è affermata come punto di riferimento nell'intercettare le loro particolari esigenze e sviluppare di conseguenza tecnologie dispiegabili sul campo. In particolare, attraverso la partecipazione a progetti di ricerca internazionali, l'ENEA ha sviluppato due dispositivi che possono contribuire a evitare e impedire l'opera di contrabbando del materiale necessario per confezionare una "bomba sporca", cioè un dispositivo capace di accoppiare la minaccia esplosiva a quella di un rilascio radiologico. Si tratta del sistema laser ILS (Integrated Laser System) e di quello a neutroni NAI (Neutron Active Interrogation system) che sono stati anche testati in condizioni più possibili vicine a quelle reali

DOI 10.12910/EAI2017-063

di **Nadia Cherubini, Violeta Lazic e Antonietta Rizzo**, ENEA

Il 14 giugno 2017 il porto di Charleston nel South Carolina è rimasto chiuso per più di sette ore a causa dell'allarme lanciato dall'intelligence statunitense circa la presenza in un container di una bomba sporca. I controlli hanno poi permesso di verificare l'infondatezza della minaccia consentendo il ripristino del normale traffico commerciale. Tuttavia questo è indicativo di quanto sia alta l'allerta su tale tipo di minaccia. Questo perché, malgrado

nessun piano di attacco terroristico che prevede l'uso di una bomba sporca o, in termini tecnici, di un Radiological Dispersal Device (RDD), sia mai stato ultimato, esso rimane uno dei più temuti scenari dagli esperti di antiterrorismo. Infatti un RDD accoppia la minaccia esplosiva con quella di contaminazione dell'area circostante l'esplosione con materiale radioattivo. Secondo gli esperti e le simulazioni effettuate, gli effetti di una bomba

sporca in termini di vittime sono legati al potenziale esplosivo della bomba mentre la conseguente dispersione radiologica, ai livelli attuali delle sorgenti reperibili, creerebbe per lo più problemi di trattamento ospedaliero dei contaminati e di decontaminazione dell'area interessata. Ben più profondo sarebbe l'impatto psicologico sulle masse soprattutto per il senso d'insicurezza e sfiducia nei confronti delle autorità preposte



alla prevenzione, che, ai loro occhi, non avrebbero il controllo sulla circolazione di materiale altamente sensibile come quello nucleare. Per questi motivi è necessario dotare le autorità dei più affidabili strumenti tecnologici capaci di affiancare l'opera d'intelligence per intercettare il materiale necessario per la fabbricazione di una bomba sporca durante la fase di contrabbando o dell'ordigno stesso in quella successiva di trasporto.

Tale necessità è stata recepita dalla stessa Commissione Europea che, nell'ambito del "Programma Horizon 2020" di sostegno alla ricerca e nell'ambito del filone *Secure Society*, ha introdotto specifiche azioni per lo sviluppo di sensori avanzati capaci di rispondere a questa esigenza. Si tratta di un complesso obiettivo scientifico e tecnologico finalizzato a migliorare lo stato attuale dell'arte in questo specifico settore sia in

termini di sensibilità di misura degli apparati sia in termini di reale utilizzabilità di essi sul campo. L'ENEA, partendo da specifiche competenze sviluppate negli anni in diversi settori che vanno dalla radioprotezione alla spettroscopia laser, ha sviluppato due sensori capaci di rivelare a distanza la presenza di materiale esplosivo, radiologico e fissile. Si tratta di Integrated Laser System (ILS) e del Neutron Active Interrogation (NAI). Le potenzialità dei due innovativi sensori sono state testate in una dimostrazione sul campo ed in una situazione il più possibile reale ma nel rispetto delle autorizzazioni rilasciate dalle Autorità competenti. Di seguito vengono descritti i principi di base delle due tecnologie e poi i risultati del test sul campo eseguito alla presenza dei principali *stakeholder* europei e sotto la supervisione di rappresentanti della Comunità Europea.

NAI (Neutron Active Interrogation system)

Il dispositivo NAI consente di rivelare in modalità remota su campioni sospetti modeste quantità di materiali fissili (^{235}U , ^{239}Pu) e fertili (^{238}U), unitamente a materiali energetici da utilizzare per la fabbricazione di esplosivi. Si tratta di uno strumento che segna un preciso avanzamento rispetto allo stato dell'arte in questo specifico settore in quanto è il primo capace di rilevare materiali fissili ed esplosivi con un singolo *set-up*. Inoltre, mentre i sistemi in questo momento disponibili sul mercato possono rilevare soltanto quantità pari a circa 300 grammi di ^{235}U , il dispositivo ENEA ha un limite di rivelazione teorico di circa 6 grammi. Il principio di funzionamento del dispositivo è il seguente: una sorgente di interrogazione opportuna emette neutroni, i quali interagendo con l'oggetto da

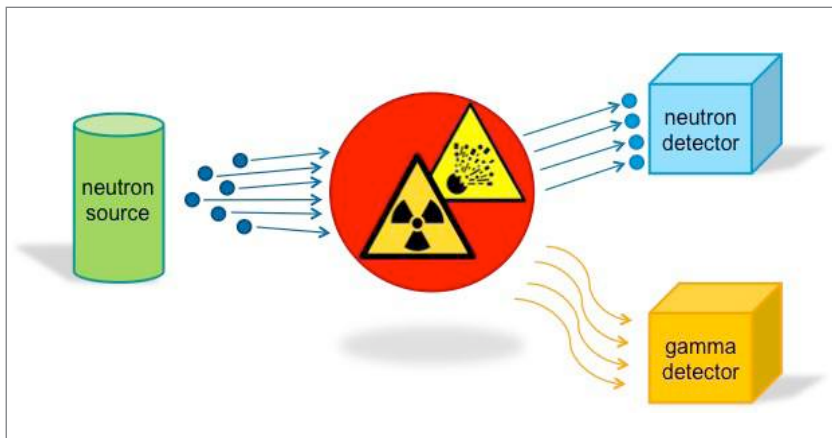


Fig. 1 Schema di funzionamento della tecnica NAI per la rivelazione simultanea di materiale fissile ed esplodente

analizzare provocano l'emissione di radiazione secondaria, neutroni e raggi γ , rivelati con opportuni rivelatori (rivelatori a ^3He per i neutroni e rivelatore HPGe per i γ). In particolare, se è presente materiale fissile vengono emessi neutroni di fissione, se sono presenti esplosivi vengono emessi γ di cattura o *scattering* anelastico per interazione dei neutroni con idrogeno, carbonio, azoto e ossigeno, noti costituenti di un esplosivo. L'elaborazione e l'analisi dei dati provenienti dai rivelatori consentirà il riconoscimento dei materiali pericolosi (Figura 1).

La sorgente di neutroni impiegata sul dispositivo NAI è un generatore di neutroni del tipo deuterio-trizio (Thermo Scientific MP320) mentre la catena di rivelatori per la misurazione dei neutroni secondari emessi dal campione dopo l'eccitazione si basa su una pluralità di rivelatori

Elemento	Energia (MeV)
C	4,44
N	5,11
O	6,13

Tab. 1 Energie caratteristiche dei raggi gamma emessi dai nuclei di interesse

a ^3He alla pressione di 4 bar e con un'efficienza di rilevazione del 5%. Per la rilevazione di raggi γ è stato adottato uno spettrometro portatile HPGe (Trans-SPEC-DX-100).

Il campione sospetto viene interrogato periodicamente con un fascio di neutroni pulsato. I neutroni di interrogazione, opportunamente termalizzati, generano fissioni indotte

sul materiale fissile contenuto nel campione, le quali sono seguite dalla rivelazione dei neutroni emessi. Il sistema di rivelazione viene attivato alla fine di ogni impulso per ridurre il contributo dei neutroni di sorgente. La discriminazione dei neutroni di sorgente da quelli di fissione indotta è basata sul metodo del Differential Die-away Time (DDT), che si fonda sui diversi tempi di decadimento dei neutroni di interrogazione e di fissione indotta.

Il dispositivo NAI è completamente gestibile da remoto e dotato di un software che garantisce allo stesso tempo il controllo del dispositivo, l'acquisizione e l'elaborazione di dati. Per l'identificazione degli esplosivi è fondamentale la rilevazione dei raggi gamma emessi dai nuclei di C, N, O, le cui energie caratteristiche sono riportate in Tabella 1.

Il vettore dei rapporti elementari e molecolari (C/N, C/O, N/O, C_2/NO , N_2/CO , N_2/O_2 , C_2/N_2 , C_2/O_2) fornisce un'univoca identificazione

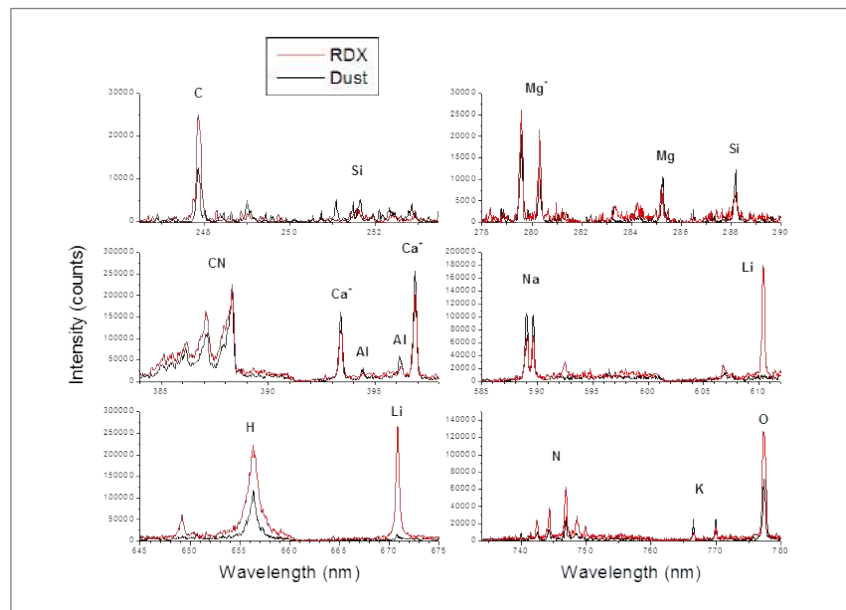


Fig. 2 Spettri LIBS per le impronte digitali contaminate con RDX o la polvere esterna



del tipo di esplosivo eventualmente rivelato.

ILS

Il dispositivo ILS integra per prima volta tre tra le più affidabili tecniche spettroscopiche basate sull'eccitazione laser (Raman, LIF e LIBS) ed è capace di eseguire misure sequenziali selezionando una delle tre tecniche senza la necessità di dover riconfigurare il sistema ovvero sostituire e/o ricollegare i vari componenti. Lo strumento ILS è stato interamente progettato, realizzato e testato dall'E-NEA per operare in modalità remota (*stand-off*) per rivelare tracce di esplosivo su superfici a distanza tra 8 m e 50 m, con la possibilità di estensione oltre i 100 m di distanza. Infatti è stato dimostrato che i terroristi durante l'opera di contrabbando e trasporto del materiale esplosivo lasciano inevitabilmente delle impronte digitali contaminate sugli automezzi utilizzati o più genericamente sulle varie superfici con cui vengono a contatto. La rivelazione a distanza di queste tracce permetterebbe di evidenziare inequivocabilmente un'azione criminosa in atto.

Il sistema ILS costituisce un evidente avanzamento rispetto allo stato dell'arte nello specifico campo della rivelazione *stand-off* di esplosivi, in quanto adotta una singola sorgente laser capace di operare alle due lunghezze d'onda necessarie per ottimizzare la risposta di ognuna delle tre tecniche usate.

Infatti, per avere segnali Raman e LIF (SLIF) intensi, bisogna utilizzare l'eccitazione laser nella regione delle basse lunghezze d'onda dell'ultravioletto (UV) mentre il segnale LIBS, basato sulla formazione del plasma sul campione, aumenta incrementando la lunghezza d'onda

d'eccitazione verso la regione del vicino infrarosso (IR). In ILS, dopo le prove in laboratorio, è stata scelta per il Raman e la LIF la IIIa armonica del laser Nd:YAG ($\lambda=355$ nm) come l'eccitazione ottimale mentre per il LIBS la lunghezza d'onda fondamentale della stessa sorgente laser a $\lambda=1064$ nm. ILS adotta solu-

zioni innovative anche nell'apparato di focalizzazione progressiva del fascio laser sul target da analizzare, nel sistema di rivelazione del segnale spettroscopico e nella gestione automatizzata e remota dell'intero dispositivo.

In Figura 2 sono riportati gli spettri LIBS acquisiti con ILS su due im-

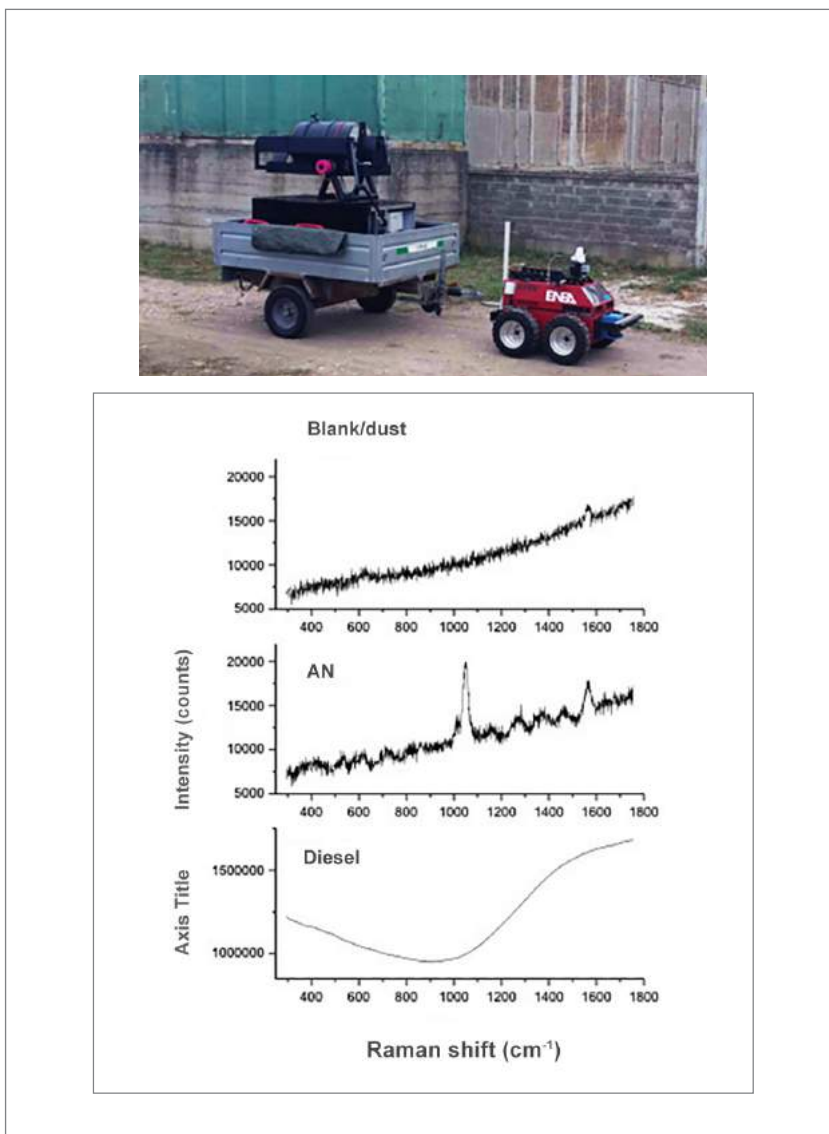


Fig. 3 Il sistema ILS trainato da Prassi (foto in alto) durante la DEMO (grafico in basso). Spettri Raman che hanno permesso di discriminare la presenza di nitrato d'ammonio (AN) su alcune impronte digitali sul veicolo usato nella DEMO



pronte digitali, una contaminata con tracce di esplosivo RDX, l'altra con comune polvere.

L'analisi dei dati permette inequivocabilmente di discriminare la presenza di esplosivo su una delle due impronte. Le prove di laboratorio hanno dimostrato che ILS è capace di rivelare la presenza di esplosivo fino a impronte di nona generazione, intendendo con questa terminologia l'impronta lasciata dopo nove contatti su diverse superfici a partire dal momento della deposizione delle tracce di esplosivo sul dito del terrorista.

Demo

Le due tecnologie sviluppate dall'ENEA sono state provate durante un'azione dimostrativa presso l'area qualificata del Centro ENEA di Frascati per sperimentazione con materiali energetici. Lo scenario ha comportato l'utilizzo di un mezzo di trasporto all'interno del quale erano stati posizionati quantitativi ammessi di nitrato d'ammonio e di materiale fissile simulando così una reale situazione di contrabbando di materiale per l'assemblaggio di una bomba

sporca. Inoltre sulla carrozzeria del veicolo erano state preventivamente lasciate impronte digitali con tracce di nitrato d'ammonio e fino alla nona generazione. In Figura 3 è riportato il sistema ILS in azione durante la dimostrazione e trainato in maniera remota dal robot Prassi, anch'esso sviluppato presso i laboratori ENEA. Il sistema, completamente azionato in remoto per assicurare l'integrità degli operatori, ha rivelato a 11 metri di distanza dal veicolo la presenza di tracce di esplosivo sulle impronte digitali riuscendo anche a discriminare la differenza rispetto a impronte re-

canti tracce di polvere e diesel (Figura 3).

La presenza di tracce di esplosivo sulle impronte digitali presenti sulla carrozzeria del veicolo sospetto costituiva un chiaro indizio che ci si trova di fronte ad un tentativo di contrabbando di materiale illecito. Il conseguente innalzamento dello stato di allerta richiedeva il dispiegamento di uno strumento capace di rivelare la natura del materiale eventualmente presente all'interno del veicolo.

Il dispositivo NAI ha permesso di rivelare (Figura 4) la presenza di 6 g di ^{235}U e di 0,5 kg di nitrato d'ammonio confermando che il veicolo era in uso per il contrabbando di materiale adatto alla realizzazione di una bomba sporca.

La deflessione del segnale misurato rispetto al segnale di fondo (vedi parte sinistra della Figura 4) indica la presenza di materiale fissile.

Conclusione

Presso i laboratori ENEA sono stati ideati, sviluppati e testati due dispositivi di misura capaci di migliorare le capacità di monitoraggio e rivelazione del materiale contrabbandato necessario per la realizzazione di

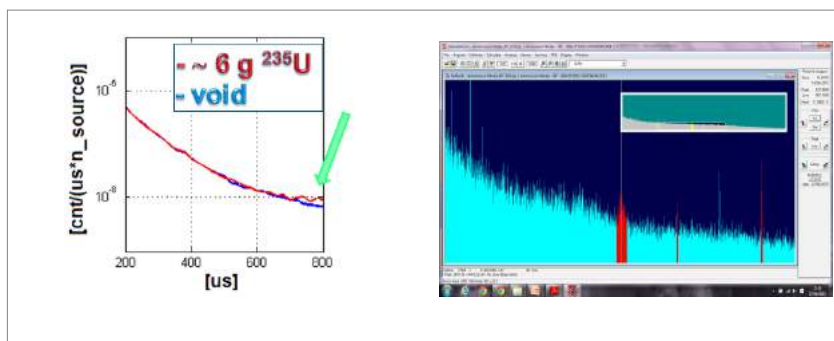


Fig. 4 Misura remota di campioni contenente 6 g di ^{235}U con il dispositivo NAI (destra). La traccia rossa è il segnale in presenza di uranio mentre quella blu rappresenta il segnale di fondo. A sinistra lo spettro gamma che identifica univocamente la presenza di nitrato d'ammonio

un Radiological Dispersal Device. I due strumenti sono il frutto delle competenze sviluppate in ENEA nel corso di molteplici programmi di ricerca e che hanno trovato applicazione nel settore della Security. ILS e NAI sono un tangibile contributo che il mondo della ricerca mette a disposizione di quelli che tecnicamente sono chiamati *practitioner*, cioè di tutte le istituzioni chiamate a

operare fattivamente sul campo per prevenire e rispondere ad attacchi terroristici. Entrambi gli strumenti segnano un miglioramento rispetto all'attuale stato dell'arte e sono costantemente migliorati e perfezionati al fine di accrescere le loro capacità di monitoraggio per un efficace contrasto alle azioni di contrabbando di materiali radiologici ed esplodenti.

I prototipi descritti, sono stati sviluppati nell'ambito del progetto EDEN cofinanziato dalla UE (grant agreement n. 313077, Settimo Programma Quadro) da un team composto dai colleghi Paolo Bartolomei, Luigi De Dominicis, Alessandro Dodaro, Ruggero Lorenzelli, Antonio Palucci, Paola Parente, Stefano Salvi, Carlo Tonelli, oltre che dagli autori.

Sorgenti di neutroni in ENEA per la salute dell'uomo

La forte carenza a livello mondiale di ^{99m}Tc , radiofarmaco fondamentale nella diagnostica medico-nucleare, rende sempre più necessario utilizzare gli impianti nazionali, anche di ricerca, per sopperire a tale carenza. L'ENEA, mettendo a disposizione del Paese le proprie infrastrutture operative e quelle in corso di progettazione, si propone come uno degli attori in prima linea nel tentare di risolvere le criticità dei centri di Medicina Nucleare italiani nel breve e nel lungo periodo

DOI 10.12910/EAI2017-064

di **Pietro Agostini, Marco Capogni, Alessandro Dodaro e Antonino Pietropaolo, ENEA**

La prevista chiusura nel 2018 del reattore nucleare canadese NRU (National Research Universal reactor - Chalk River, Ontario) e l'arresto dell'iter autorizzativo del reattore canadese Maples-1, che avrebbe dovuto sopperire alla mancata produzione del reattore NRU, sono responsabili di una forte carenza a livello mondiale di ^{99m}Tc , radiofarmaco fondamentale nella diagnostica medico-nucleare. Il reattore NRU copre, mediante fissione nucleare, il 40% del fabbisogno mondiale di ^{99m}Tc ed il 60% degli Stati Uniti, mentre il Maples-1 non è stato autorizzato all'esercizio per problemi di sicurezza legati ad un

imprevisto ed inatteso coefficiente positivo di reattività.

Già da qualche anno si è manifestata la necessità di utilizzare gli impianti nazionali, anche di ricerca, caratterizzati da flussi neutronici meno intensi, al fine di sopperire alla carenza del suddetto radiofarmaco attraverso forniture locali da produzione per attivazione neutronica tramite la reazione $^{98}\text{Mo}(n,\gamma)^{99}\text{Mo}$ (il ^{99}Mo è il radioisotopo precursore del ^{99m}Tc), sebbene tale metodo risulti avere attività specifiche più contenute rispetto al metodo della fissione nucleare da uranio.

Inoltre, i recenti progressi avuti con radiofarmaci teranostici, consistenti

nella possibilità di utilizzare un unico radioisotopo o la combinazione di due per effettuare simultaneamente diagnosi precoce e terapia, rendono sempre più attuale la ricerca e lo sviluppo nel campo della Medicina Nucleare.

Premessa

La Medicina Nucleare è da tempo diventata pratica comune sia in ambito diagnostico che terapeutico; in particolare, di recente è nata una nuova disciplina, la teranostica, che consiste nell'utilizzare radioisotopi per effettuare contemporaneamente diagnosi e cura individuando le cel-



lule tumorali e cercando allo stesso tempo di danneggiarle impedendone la moltiplicazione.

Per lo sviluppo di questa disciplina è necessario selezionare e produrre nuovi radioisotopi (solitamente β^+/β^- emettitori) che possano ricoprire il duplice ruolo riducendo al minimo l'impatto tossicologico per il corpo umano.

Limitandosi al campo della diagnostica medico-nucleare più tradizionale, nel breve periodo si registrerà una forte carenza a livello mondiale di ^{99m}Tc , radiofarmaco fondamentale in quest'ambito, a causa dell'arresto programmato nel 2018 del reattore nucleare canadese NRU (National Research Universal Reactor - Chalk River, Ontario) e l'interruzione definitiva dell'iter autorizzativo del reattore canadese Maples-1, che avrebbe dovuto sopperire alla mancata produzione del reattore NRU. In tutto il mondo stanno nascendo progetti di R&S che hanno quale obiettivo pri-

mario l'utilizzo di reattori di ricerca per una produzione di ^{99m}Tc che possa soddisfare le esigenze delle richieste locali.

L'ENEA si propone di mettere a disposizione del Paese le proprie infrastrutture e competenze per costituire un centro di eccellenza nazionale per lo studio di nuovi radioisotopi da utilizzarsi nella Medicina Nucleare e per la produzione massiva di quelli tradizionalmente utilizzati in diagnostica e terapia.

Il Progetto Molibdeno

Nel corso dell'ultimo biennio sono state eseguite una serie di attività teorico-sperimentali sull'attivazione del ^{98}Mo nei reattori di ricerca, dimostrando che, anche in presenza di densità di flusso di neutroni dell'ordine di $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, tale tecnologia risulta fra le più promettenti e disponibili nel breve periodo; per questo motivo è stato proposto e approvato

dal Vertice dell'Agenzia il Progetto Molibdeno, che prevede l'utilizzo intensivo del reattore di ricerca TRIGA RC-1 del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA per la produzione di ^{99}Mo (il ^{99}Mo è il radioisotopo precursore del ^{99m}Tc).

Il reattore nucleare di ricerca TRIGA RC-1 [1] (Training Research Isotopes General Atomics - Reattore Casaccia 1) è una sorgente di neutroni termici. TRIGA RC-1 (Figura 1) è stato costruito nel 1960 nella sua prima versione a 100 kW di potenza nell'ambito dell'iniziativa USA *Atoms for Peace* e successivamente, nel 1967, è stato portato alla potenza di 1 MW su progetto ENEA.

Il nocciolo del reattore consiste in una struttura anulare immersa in acqua, che ha la funzione di refrigerante primario. Gli elementi di combustibile del nocciolo sono geometricamente disposti su sette cilindri coassiali.

Sulla base delle caratteristiche neutroniche del reattore TRIGA RC-1, tenendo conto anche di recenti studi [2] relativi a impianti simili, è stata effettuata una valutazione teorica delle potenzialità di produzione ipotizzando l'irraggiamento di un target di molibdeno metallico arricchito al 98,4% in ^{98}Mo nel canale centrale del nocciolo. Le concentrazioni di attività ottenibili in modalità di irraggiamento continua (120 ore consecutive) e discontinua (6 ore al giorno 5 giorni a settimana) sono risultate pari rispettivamente a 30 GBq/g e 9 GBq/g [3]. Tali valori sono stati confermati dalle prime risultanze sperimentali scalando i risultati ottenuti su campioni reali con tempi di irraggiamento minori ed utilizzando molibdeno in composizione isotopica naturale. È attualmente in corso la preparazione di target di molibdeno metallico arricchito in ^{98}Mo



Fig. 1 Il reattore TRIGA RC-1

sui quali saranno replicati i test per verificarne la riproducibilità e la rappresentatività.

L'opzione Sargentina

La produzione di ^{99}Mo , oltre che con il ^{98}Mo utilizzando i neutroni termici del reattore TRIGA, che rappresenta la risposta tecnologica a breve termine, può essere fatta anche con l'utilizzo di neutroni veloci, in particolare quelli generati dalla fusione nucleare di deuterio e trizio.

La produzione si basa sull'utilizzo di target arricchiti in ^{100}Mo (isotopo del molibdeno con abbondanza relativa

del 10% nell'elemento naturale) che si trasformano in ^{99}Mo se bombardati con neutroni a 14 MeV.

Questa via alternativa, pur essendo contemplata in diversi documenti sia della IAEA che dell'OCSE [4] e nonostante i numerosi vantaggi che offrirebbe, è di fatto inattuabile perché manca nel mondo una sorgente con un intenso flusso di neutroni (dell'ordine di 10^{15} s^{-1}) da 14 MeV.

Tuttavia, uno studio di fattibilità su questa via alternativa ai reattori per produrre ^{99}Mo da neutroni veloci da fusione mediante la reazione $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$ è stato ideato e condotto in ENEA [5], utilizzando

la sorgente di neutroni da 14 MeV, chiamata Frascati Neutron Generator (FNG) e operativa presso il Centro Ricerche di Frascati dell'ENEA. Il fascio di neutroni a 14 MeV di energia viene prodotto, con un flusso di neutroni di 10^{10} s^{-1} , grazie al processo di fusione realizzato mediante un acceleratore lineare di deutoni ionizzati che incidono su un bersaglio di metallo contenente trizio.

Le prove sperimentali, supportate da calcoli Monte Carlo, sono state condotte irraggiando molibdeno naturale, in forma di polvere metallica, presso FNG ed effettuando



misurazioni dell'attività prodotta, in condizioni di elevata affidabilità metrologica, presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (INMRI) sito nel Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA. I risultati ottenuti sono stati molto interessanti ed oggetto di ulteriori pubblicazioni scientifiche. Peraltro le misure condotte in condizioni di riferibilità ai campioni nazionali di attività dell'INMRI hanno consentito di validare il Monte Carlo sviluppato in fase progettuale dell'esperimento rendendolo così strumento particolarmente utile per previsioni teoriche di produzione di ^{99}Mo da sorgenti neutroniche a fusione ma molto più intense di FNG.

In virtù del successo di tali prove sperimentali, l'ENEA ha riconsiderato, nell'ottica della problematica del $^{99\text{m}}\text{Tc}$, una valida idea progettuale di realizzazione di una sorgente neutronica intensa, chiamata New Sorgentina Fusion Source (NSFS) [6], che in linea di principio genererebbe un flusso di neutroni da 14 MeV dell'ordine di 10^{15} s^{-1} , adatto alla produzione su scala industriale di radionuclidi di interesse della Medicina Nucleare.

NSFS si basa su due bersagli rotanti che contengono trizio in forma di nuclei assorbiti su substrato metallico e con fasci di trizio e deuterio che servono, il primo per fornire trizio al bersaglio in modo continuo e l'altro per accelerare deuterio e far avvenire sul target le reazioni di fusione deuterio-trizio (Figura 2).

FNG ha dunque rappresentato, per la tematica radionuclidi per la salute, una NSFS a scala ridotta, ma utile per prove di laboratorio e per poter quantificare su base sperimentale la produzione che NSFS potrebbe fare a scala più elevata, dato che en-

trambe sfruttano lo stesso processo di produzione di neutroni sebbene FNG sia diecimila volte meno intensa di NSFS.

In uno scenario, estrapolato dai risultati sperimentali ottenuti su FNG, in cui si pensasse di irraggiare a giorni alterni (quindi con un pessimistico *duty cycle* del 50%), la produzione di ^{99}Mo potrebbe arrivare a 35 TBq a settimana, corrispondente a circa il 10% dell'odierno fabbisogno mondiale di ^{99}Mo .

Se si pensasse a un irraggiamento continuo, la frazione di fabbisogno

a lungo periodo. La nuova macchina inoltre darebbe risposta alle direttive degli organismi internazionali (IAEA, OCSE) che spingono per trovare soluzioni non reattoristiche nel lungo periodo.

L'ipotesi di un centro di radiofarmacia in Casaccia

Fin qui sono state descritte due opzioni, per il breve e il medio periodo, relative alla sola produzione del materiale grezzo (il ^{99}Mo) da fornire ai centri specializzati per la produzio-

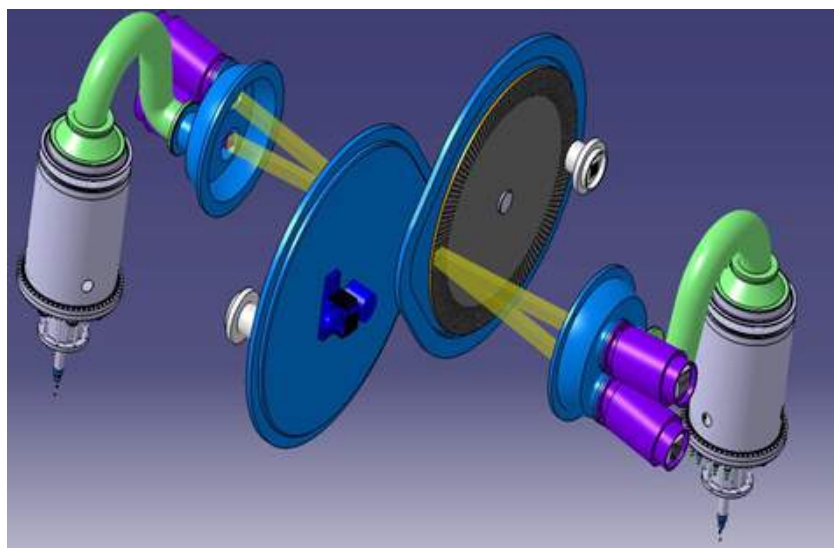


Fig. 2 Modello schematico 3D di NSFS

mondiale che NSFS potrebbe coprire, con le caratteristiche costruttive progettuali presenti, sarebbe del 20%.

Considerando che l'infrastruttura che al momento ha la maggior produzione mondiale è il reattore di Petten in Olanda (che ha più di 50 anni di vita) con circa il 33% del fabbisogno mondiale, NSFS rappresenterebbe una soluzione di forte rilevanza per la produzione di radioisotopi per la medicina nucleare

ne del radiofarmaco vero e proprio. L'ideale anello di congiunzione fra le due opzioni potrebbe essere l'istituzione di un centro di radiofarmacia accreditato presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia.

Infatti l'ENEA, tramite le proprie competenze tecniche ed operative, è potenzialmente in grado di gestire tutte le fasi del processo, dall'irraggiamento del Molibdeno metallico all'estrazione del $^{99\text{m}}\text{Tc}$ dalla matrice irraggiata mediante le *facility* neutro-

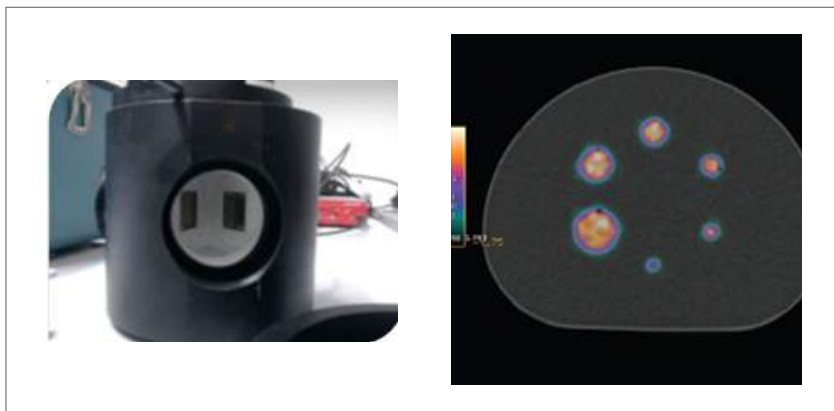


Fig. 3a Rivelatore TDCR portatile dell'ENEA-INMRI per misure in situ di radionuclidi β -emettitori e Fig. 3b *Imaging* molecolare con fantoccio contenente ^{90}Y con attività misurata in situ con TDCR portatile

niche esistenti e funzionanti presso i propri centri di Frascati e Casaccia. La preparazione dell'agente galenico con il $^{99\text{m}}\text{Tc}$ prodotto in ENEA è allo studio e richiede la possibilità di investire nelle proprie infrastrutture in modo da soddisfare gli standard di Good Manufacturing Practices (GMP). In particolare la presenza in ENEA dell'INMRI consente di verificare e certificare in termini di

purezza radionuclidica e in attività il radiofarmaco prodotto, oltreché provvedere ad un costante controllo della strumentazione utilizzata nella radiofarmacia (quali calibratori di attività, spettrometri gamma, sistemi a scintillatori liquidi) per misure di attività (in controlli di qualità e in celle di dispensazione) rispondendo in tal modo, grazie all'elevato standard metrologico delle misure, ai

requisiti della Farmacopea Europea e dell'Agenzia Italiana del Farmaco (AIFA).

Tale scenario in primo luogo consentirebbe di completare tutto il processo di produzione del radiofarmaco in modo da renderlo disponibile per l'utenza esterna e ponendo, in tal modo, l'Agenzia in prima linea in un settore estremamente importante e strategico per il Paese e che al momento vede solo attori locali e specializzati su un portafoglio-prodotti limitato. Inoltre, sarebbe notevole il contributo a supporto delle aziende nazionali che investono in ricerca e sviluppo di nuovi radiofarmaci che troverebbero nell'ENEA un partner istituzionale dal *know-how* riconosciuto in tutti gli ambiti del settore. Ciò aprirebbe degli orizzonti di R&S ad ampio spettro anche in settori innovativi della medicina nucleare, quale l'*imaging* medicale ottenuto con radiofarmaci (*imaging* molecolare) teranostici quali ^{64}Cu e ^{90}Y (Fig. 3a e Fig. 3b).

BIBLIOGRAFIA

1. M. Palomba, M. Carta, L. Falconi, M. G. Iorio, "Activities at TRIGA RC-1 ENEA Research Reactor", IAEA International Conference on Research Reactors: Safe Management and Effective Utilization, Vienna, Austria, 16-20 November 2015, Conference ID: 46533 (CN-231)
2. Artem V. Matyskin, Danas Ridikas, V. S. Skuridin, Johannes Sterba, Georg Steinhauser, (2012), "Feasibility study for production of ^{99m}Tc by neutron irradiation of MoO_3 in a 250 kW TRIGA Mark II reactor", *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry* (0236-5731)
3. O. Aronica, A. Dodaro, G. Giorgiantoni, M. Olivetti, F. Pisacane, (2016), "Produzione di ^{99m}Tc nel reattore TRIGA RC-1 ENEA Casaccia - Studio di fattibilità", Id. Doc. FSN FISS (16) 03, ENEA
4. NEA-OECD, "Medical isotope supply in the future: Production capacity and demand forecast for the $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ market, 2015-2020". NEA Report NEA/SEN/HLGMR (2014)2, Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France (2014)
5. M. Capogni, L. Quintieri (STFC ISIS Facility), A. Pietropaolo, " ^{99m}Tc production via $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$ reaction using 14 MeV neutrons from a D-T neutron source: Discussion for a scientific case", ENEA Technical Report RT/2016/32/ENEA, November 2016
6. M. Pillon, M. Angelone, A. Pietropaolo, A. Pizzuto, *Fus. Eng. Des.* 89, 2141 (2014)

DTT, un tokamak per lo studio dei carichi termici dei reattori a fusione

Un progetto italiano da 500 milioni per traghettare la comunità scientifica dalla realizzazione del reattore sperimentale ITER alla realizzazione di un reattore a fusione. Lo scopo di DTT è fornire soluzioni integrate agli aspetti fisici e tecnologici della problematica dei flussi termici sul divertore, in supporto alla progettazione del divertore per DEMO e dei futuri reattori a fusione. Per questo DTT è stato progettato per riprodurre caratteristiche del bordo plasma e di interazione plasma-parete facilmente scalabili a quelle di DEMO. Il progetto DTT supporta la roadmap europea sulla fusione e darà vita ad un polo scientifico e tecnologico strategico per il sistema italiano, con ricadute di grande rilievo per tutta la comunità scientifica europea e per le aziende italiane

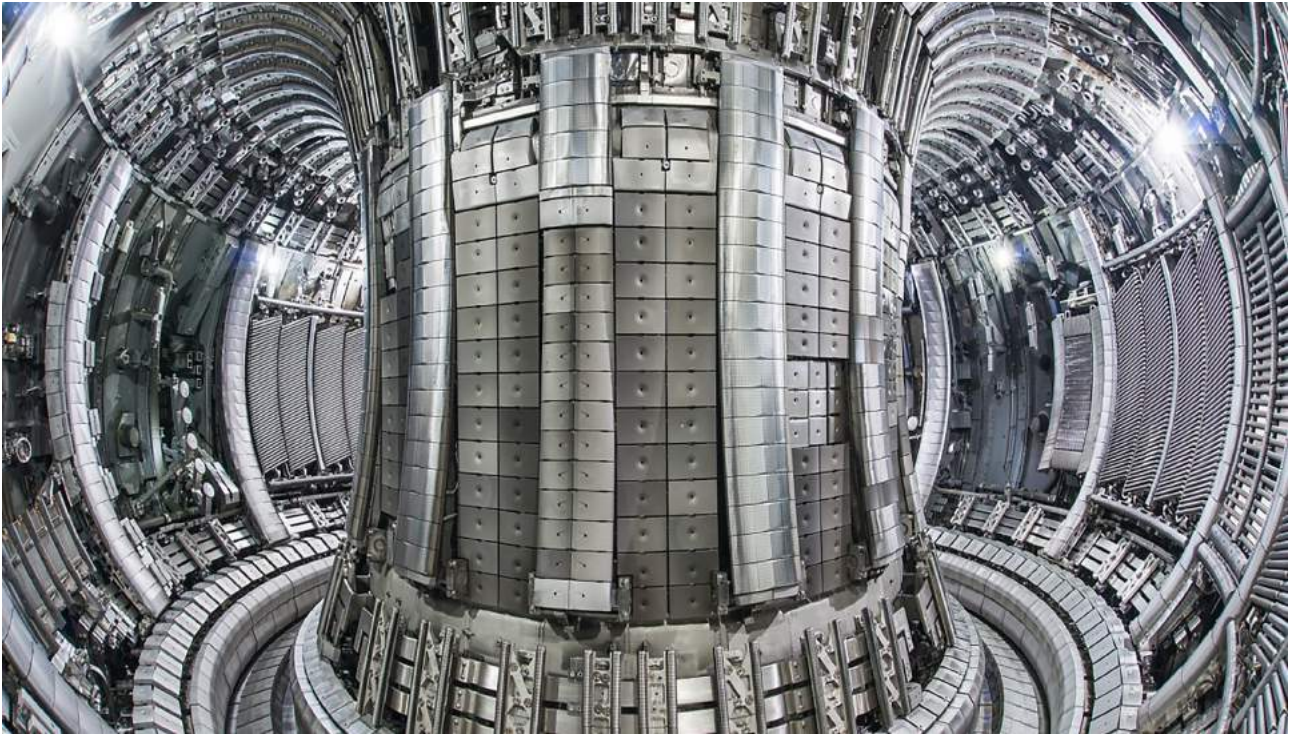
DOI 10.12910/EAI2017-065

di **Antonio Botrugno e Flavio Crisanti**, ENEA

La roadmap europea per la commercializzazione dell'energia da fusione è regolata dalle linee guida stabilite nel 2012 dall'Agenzia europea EFDA (European Fusion Development Agreement), prima di diventare EUROfusion nel 2014 [1]. L'elemento chiave della roadmap è rappresentato dal reattore sperimentale ITER, che affronta molte delle sfide individuate nelle linee guida del programma ed è oggi riconosciuto a livello mondiale come la via più promettente per lo sviluppo della fusione termo-

nucleare a confinamento magnetico. La seconda fase del programma europeo prevede la realizzazione di DEMO, un reattore atto a dimostrare la fattibilità della fornitura di energia elettrica alla rete. Dopo ITER, infatti, rimarranno ancora da affrontare alcuni problemi come la sostenibilità del ciclo del trizio, l'uso di materiali resistenti agli alti flussi neutronici, la possibilità di operare il reattore in maniera stazionaria. Una delle principali sfide scientifiche e tecnologiche ancora irrisolte per la sostenibilità del programma

fusione nella fase post ITER, è quella di progettare un sistema in grado di sopportare per lunghi periodi i grandi carichi termici e di radiazione previsti sulle componenti affacciate al plasma (come la parete della camera da vuoto e il divertore). Il flusso termico uscente dal plasma è in gran parte associato a particelle cariche. I moderni tokamak sono basati su una configurazione con separatrice in cui il plasma non è a contatto con la parete ed in questa configurazione le particelle cariche vengono opportunamente convo-



gliate da campi magnetici in una regione più esterna rispetto alla parete del reattore, detta divertore (Figura 1). Il divertore risulta quindi il componente più critico di un reattore a fusione. Le simulazioni di plasmi ai regimi di funzionamento dei futuri reattori a fusione di potenza mostrano che il divertore dovrebbe sopportare carichi termici superiori a 50 MW/m^2 , mentre attualmente le componenti in tungsteno (materiale scelto per il divertore di ITER) possono sopportare carichi termici massimi che si attestano attorno ai $5\div 10 \text{ MW/m}^2$, con carichi transienti fino a 15 MW/m^2 .

In questo contesto, EUROfusion ha fatto partire un programma e varie attività per studiare le possibili soluzioni al problema dei carichi termici in DEMO. Affrontare il problema con le capacità offerte da macchine già esistenti come ASDEX e JT-60SA

o in fase di realizzazione come lo stesso ITER, espone a gravi rischi di incertezza nella progettazione di un divertore per DEMO, ciò a causa della grande differenza tra le condizioni di plasma, sia al bordo che al centro della zona confinata, tra le attuali macchine e quelle previste in DEMO. Appare sempre più evidente la necessità di realizzare una *facility* dedicata allo studio di questo problema, con caratteristiche del bordo plasma e di interazione plasma-parete facilmente scalabili a quelle di DEMO e dei futuri reattori. A tale scopo, la comunità italiana che lavora sulla fusione ha progettato e si propone di costruire la Divertor Tokamak Test (DTT) Facility, un progetto da 500 milioni di euro che permette di riprodurre alcune delle caratteristiche del bordo plasma di DEMO. Lo scopo di DTT è fornire soluzioni integrate agli aspetti fisici

e tecnologici della problematica dei flussi termici sul divertore, in supporto alla progettazione del divertore per DEMO e potenzialmente anche alla sua fase di funzionamento. Dal punto di vista tecnico, DTT è un tokamak di medie dimensioni capace di confinare un plasma di 33 m^2 a temperature di oltre 100 milioni di gradi per tempi di circa 100 secondi (Figura 2). DTT è in grado di operare con plasmi di deuterio, corrente di plasma (I_p) fino a 6 MA, campo magnetico toroidale (B_T) fino a 6 T. Il plasma è confinato mediante magneti superconduttori ed è poi portato a temperature fusionistiche da una potenza di riscaldamento addizionale di 45 MW di cui 25 MW forniti da onde elettromagnetiche che trasferiscono energia agli elettroni, 10 MW da onde elettromagnetiche che trasferiscono energia agli ioni e altri 10 MW da

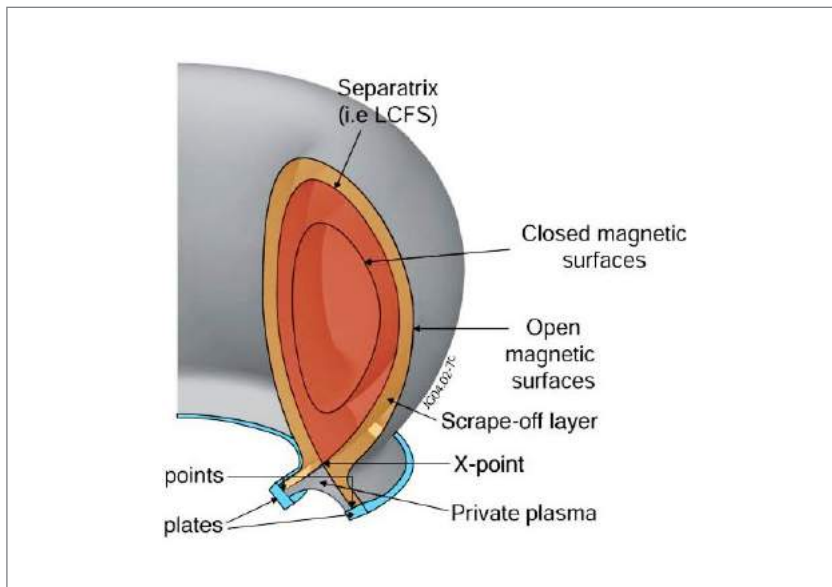


Fig. 1 Schema della parete di un reattore tokamak con al centro il divertore

particelle neutre veloci immerse nel plasma. DTT è in grado di generare flussi termici sulle piastre del divertore superiori ai 20 MW/m². Ulteriori dettagli sui parametri di costruzione e di operazione del tokamak possono essere reperiti nel *Project Proposal* [2].

Il problema dei carichi termici sul divertore di un tokamak è attualmente affrontato dalla comunità scientifica internazionale seguendo approcci differenti, sia mediante lo sviluppo di materiali innovativi in grado di sopportare i valori dei flussi termici previsti nei futuri reattori (come la parete a litio liquido o stagno liquido studiate in FTU [3] presso il centro ricerche ENEA di Frascati), sia mediante lo sviluppo di configurazioni magnetiche avanzate nella zona del divertore, in grado di ridurre il carico sui materiali redistribuendo il flusso termico su superfici più ampie (come il divertore Super-X in MAST-U [4] a Culham nel Regno Unito o quello *Snowflake* in TCV

[5] a Losanna in Svizzera). Uno dei punti di forza del progetto DTT è quello di poter affrontare il problema da entrambi i punti di vista. Ciò è dovuto ad una accurata scelta dei parametri di progettazione che permette un'ampia flessibilità operativa. DTT sarà in grado di operare con un divertore in tungsteno o con un metallo liquido (litio o stagno), di usare differenti configurazioni magnetiche come quelle a singolo e a doppio nullo, quelle *snowflake* e quasi *snowflake*. Inoltre, questi studi potranno essere svolti usando molteplici scenari di plasma in modo da riprodurre un ampio intervallo di valori per le condizioni di plasma, sia al bordo che nella zona centrale di alto confinamento. DTT permetterà non solo di valutare le performance delle soluzioni testate ma anche di valutarne la fattibilità tecnologica e la compatibilità con le performance del plasma. La grande flessibilità progettuale permetterà anche di testare soluzioni diverse derivanti da eventuali mi-

glioramenti scientifici e tecnologici dei prossimi anni.

Il progetto DTT definisce un importante ambito del contributo italiano al più ampio programma europeo sulla fusione. Il progetto è il risultato di una visione strategica di insieme che mette al centro non solo l'avanzamento delle conoscenze in settori chiave per lo sviluppo della scienza e tecnologia del plasma e della fusione, ma anche lo sfruttamento e il consolidamento delle eccellenze italiane acquisite negli anni e riconosciute a livello internazionale, come lo studio dei plasmi ad alto campo magnetico, lo studio dei materiali per la fusione etc. Inoltre, le attività di ricerca correlate costituiranno una notevole spinta per lo sviluppo di tecnologie innovative in vari settori, con rilevanti ricadute per le industrie italiane, ad esempio, oltre allo studio dei materiali funzionali al divertore, DTT è anche un eccellente test per i materiali superconduttori di ultima generazione basati sul Nb₃Sn e realizzati dall'ENEA in collaborazione con l'industria italiana. L'uso di magneti superconduttori permette di operare ad alto campo magnetico per confinare plasmi con alta densità di potenza minimizzando la dissipazione dei conduttori e riducendo quindi i costi di operazione. Il progetto DTT è stato proposto da ENEA in collaborazione con il Centro Nazionale di Ricerche (CNR), l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), il Consorzio di Ricerca per l'Energia, l'Automazione e le Tecnologie dell'Elettromagnetismo (CREATE), il consorzio RFX, il Politecnico di Torino e l'Università degli Studi di Milano. Nell'aprile 2017 la Commissione attività produttive della Camera ha approvato una risoluzione che impe-



gna il Governo ad assumere iniziative per favorire la realizzazione del progetto, e nel mese di luglio 2017 anche EUROfusion si è impegnata a lo stesso. Il progetto DTT può quindi dare vita nei prossimi anni ad un polo scientifico e tecnologico strategico per il sistema italiano, con circa 2000 addetti e ricadute di grande rilievo per tutta la comunità scientifica e le aziende italiane.

La fase di costruzione di DTT è pianificata in 7 anni e il reattore potrebbe essere operativo già nel 2025, con l'obiettivo di operare per almeno 20 anni e la possibilità di funzionare anche in parallelo a DEMO. DTT fornirà risposte scientifiche, tecniche e tecnologiche cruciali destinate a risolvere una delle maggiori criticità dei programmi mondiali sulla fusio-

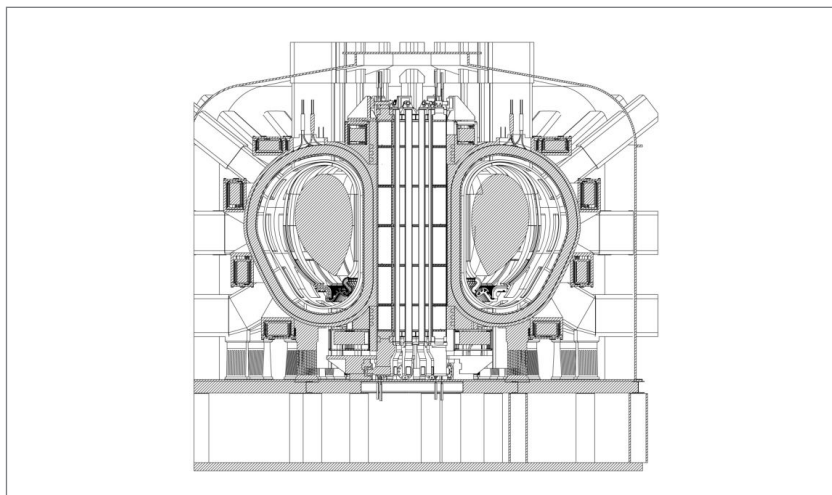


Fig. 2 Schema del Divertor Tokamak Test (DTT) Facility

ne. Si tratta di un progetto chiave per traghettare la comunità scientifica dalla realizzazione di ITER a quella

di DEMO riducendo con un investimento modesto i rischi di progetto di DEMO.

BIBLIOGRAFIA

1. *Fusion Electricity – A roadmap to the realisation of fusion energy*, 2012 (<https://www.euro-fusion.org/eurofusion/the-road-to-fusion-electricity>)
2. *DTT – Divertor Tokamak Test facility*, 2015 (<http://www.enea.it/it/pubblicazioni/edizioni-enea/2015/project-proposal-dtt>)
3. Mazzitelli G. et al., *Nucl. Fusion*, 51, 073006, 2011
4. http://www.ccf.ac.uk/mast_upgrade_project.aspx
5. Reimerdes H., et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* 55 (2013) 124027

Il Servizio Integrato per la gestione dei rifiuti radioattivi di origine non elettro-nucleare attraverso l'esperienza operativa di Nucleco

Al termine della loro vita utile le sorgenti di radiazioni ionizzanti non più utilizzate nel settore biomedico, in quello industriale e nella ricerca, e i rifiuti radioattivi generati da quelle attività sono instradati in un processo normativo, tecnico ed operativo per scongiurare il loro rilascio in ambiente e il contatto con la popolazione

DOI 10.12910/EAI2017-066

di **Battistina Bianchilli, Giorgio Sambatakakis e Monica Sisti**, *Nucleco SpA*

Quotidianamente, su tutto il territorio italiano, vengono utilizzate sorgenti di radiazioni ionizzanti per una molteplicità di applicazioni. Tipici esempi sono rappresentati dal settore biomedicale, sia per usi diagnostici (radiografia a raggi X, TAC, PEC, scintigrafie con traccianti radioattivi) sia per usi terapeutici (radioterapia), da quello industriale (ad esempio in sistemi di misura dell'industria cartaria, per la sterilizzazione di alimenti e di materiali sanitari, in alcuni tipi di

rilevatori di fumo) e da quello della ricerca.

Risulta evidente come, al termine della loro vita utile, tali sorgenti debbano essere opportunamente instradate in un processo normativo, tecnico ed operativo che scongiuri il loro inavvertito rilascio in ambiente e il conseguente accidentale contatto con l'ignara popolazione, impedendo per quest'ultima qualsiasi conseguenza sulla salute. Tale necessità risulta ovviamente ancor più evidente nel caso in cui si dovesse verificare il rinvenimento di sorgenti incusto-

dite, le cosiddette "sorgenti orfane", che impone un rapido ed efficace intervento.

Chi sono e cosa fanno gli operatori del settore

A tale scopo è stato istituito in Italia uno strumento tecnico-operativo in grado di farsi carico di "tutte le fasi del ciclo di gestione delle sorgenti non più utilizzate, quali la predisposizione al trasporto, il trasporto, la caratterizzazione, l'eventuale trattamento e condizionamento e il

deposito provvisorio”, indicato con il nome di Servizio Integrato, in accordo a quanto stabilito dal Decreto Legislativo 52/2007.

Come sancito dal suddetto Decreto, il Gestore del Servizio Integrato è l'ENEA, che esercita un'azione di indirizzo e supervisione a livello nazionale sull'intero comparto della raccolta e gestione dei rifiuti non elettronucleari a media e bassa attività e delle sorgenti radioattive.

Nell'ambito del Servizio Integrato svolgono poi la propria attività una serie di Operatori, intendendo con tale nomenclatura le persone fisiche o giuridiche che, in virtù delle autorizzazioni rilasciate dalle competenti autorità, svolgono attività di servizio nel campo della raccolta ed eventualmente del trasporto dei rifiuti radioattivi e delle sorgenti non

più utilizzate; gli Operatori possono disporre di depositi per l'immagazzinamento temporaneo degli stessi oppure possono disporre di deposito in quanto titolari di un'autorizzazione al commercio di sostanze radioattive. Il trasporto dei rifiuti radioattivi e delle sorgenti non più utilizzate può avvenire con propri mezzi omologati, o essere affidato a vettore terzo autorizzato, in possesso di mezzi omologati.

ENEA rilascia annualmente a tutti gli operatori del Servizio Integrato che ne facciano richiesta uno specifico attestato di appartenenza, a seguito di valutazione delle loro effettive capacità tecniche e autorizzazione per la raccolta dei rifiuti radioattivi. ENEA assume la proprietà di sorgenti e rifiuti radioattivi raccolti dagli Operatori del Servizio Integrato

e conferiti alla propria partecipata Nucleco SpA (Figura 1).

Il ruolo della Nucleco SpA

Fra gli Operatori agenti in quest'ambito, indubbiamente una delle eccellenze è rappresentata dalla Nucleco SpA, tanto per l'ampia esperienza maturata in oltre trenta anni di attività quanto per il costante aggiornamento delle tecniche e dei mezzi adottati.

Nucleco SpA nasce il 5 maggio del 1981, a seguito di una delibera del CIPE (Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica) dell'11/07/80; all'inizio i suoi azionisti sono società del Gruppo ENI (prima Agip e poi Ambiente SpA) che detengono la quota di maggioranza ed ENEA per il restante 40%.



SERVIZIO INTEGRATO

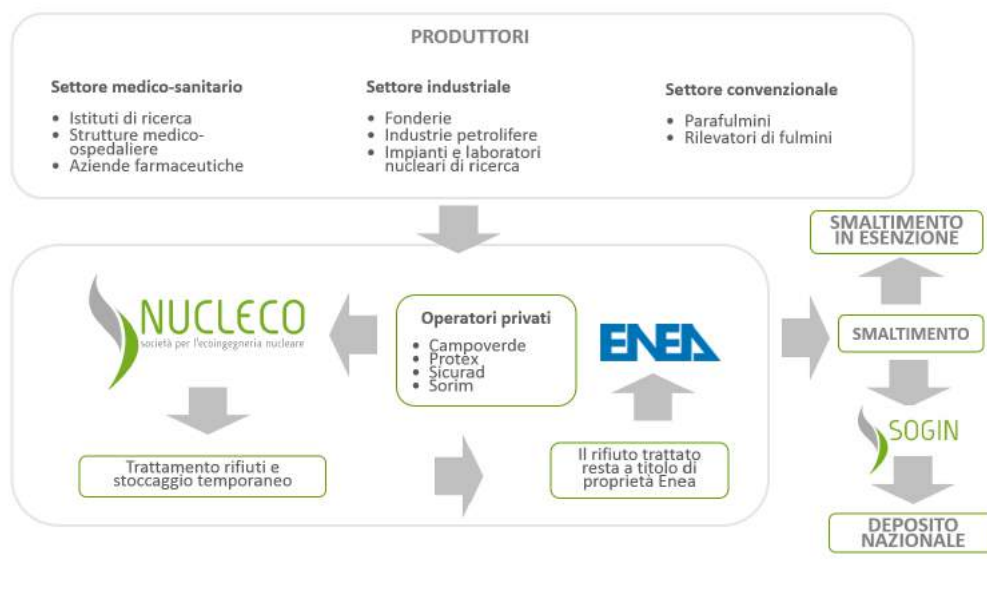


Fig. 1 Il Servizio integrato per la gestione dei rifiuti radioattivi di origine non elettro-nucleare

Dal 16 settembre 2004 la quota di maggioranza è stata acquistata da Sogin SpA (Società per la Gestione degli Impianti Nucleari) che, in tal modo, ha costituito il Gruppo Sogin. Nucleco è dotata di autorizzazioni proprie per la raccolta di rifiuti radioattivi, ai sensi dell'art. 31 del D.Lgs. 230/95 e s.m.i. ed al trasporto stradale di materiale radioattivo, ai sensi dell'art. 21 dello stesso Decreto.

Nel 1986, Nucleco ha stipulato con ENEA una convenzione con la quale diviene affidataria della gestione operativa delle attività di trattamento, condizionamento, custodia temporanea dei rifiuti radioattivi a bassa e media attività provenienti dai settori industriali e sanitari italiani. A tale scopo ENEA rende disponibili alla Nucleco le proprie infrastrutture di deposito temporaneo e gli impianti

di trattamento e condizionamento, collocate presso il Centro Ricerche Casaccia, debitamente autorizzate allo scopo.

Il percorso del rifiuto radioattivo

Al fine di illustrare sinteticamente le attività svolte da Nucleco nell'ambito del Servizio Integrato, può risultare di interesse seguire il percorso che un rifiuto radioattivo effettua dal momento in cui il suo produttore¹ richiede l'attivazione del servizio o si verifica il rinvenimento accidentale di sorgenti orfane.

La prima fase è quella della "raccolta" presso il detentore/produttore dei rifiuti e/o delle sorgenti radioattive previa valutazione delle caratteristiche chimico-fisiche e radiologiche dichiarate dal detentore/produttore stesso, ai fini della verifica dell'accet-

tabilità presso le infrastrutture del Complesso Nucleo, sulla base delle condizioni e prescrizioni dell'apparato autorizzativo nel cui alveo Nucleco opera. Su richiesta del Cliente Nucleco è in grado di fornire il servizio di confezionamento dei rifiuti, la predisposizione al trasporto e, quindi, il successivo trasporto presso il Centro Ricerche Casaccia.

Talvolta tali attività possono essere assolte da Operatori esterni, debitamente competenti e autorizzati, che conferiscono i rifiuti e le sorgenti ritirati a Nucleco per le successive fasi di trattamento e messa in sicurezza. La successiva fase consiste nell'accettazione presso le infrastrutture di Nucleco, durante la quale i rifiuti sono sottoposti a una serie di controlli (visivi di integrità del collo, di intensità di dose e di contaminazione superficiale trasferibile) e



Fig. 2 Tomografo Gamma a Scansione, uno dei sistemi di caratterizzazione radiologica utilizzati in Nucleco

contestualmente vengono svolte le verifiche di completezza della documentazione che accompagna i colli. I rifiuti conferiti sono poi sottoposti alla caratterizzazione chimica e radiologica, attività con le quali si verificano i dati dichiarati dal detentore/

produttore del rifiuto e in funzione dei cui risultati è possibile stabilire le azioni successive da intraprendere.

La caratterizzazione radiologica

La caratterizzazione radiologica ha

lo scopo di determinare le caratteristiche radiologiche del rifiuto radioattivo (radionuclidi presenti con le relative attività), ottenendo i dati e le informazioni necessari alla sua classificazione, a definire le modalità per il suo trattamento e condizionamento e alla verifica dei limiti e prescrizioni per l'eventuale smaltimento. In Nucleco vengono utilizzate tecniche strumentali di misura distruttive e non distruttive, nelle modalità invasive e non invasive, e modelli semi-empirici e procedure di calcolo. Fra le tecniche non distruttive sono adottati sistemi di misura quali (Figura 2):

- sistemi di spettrometria γ SGS (Segmented Gamma Scanner),
- sistemi di investigazione neutronica attiva e passiva,
- tomografia gamma a scansione e radiografi.

Per l'esecuzione di analisi distruttive, Nucleco può contare su sistemi di

Esempio di intervento sul territorio: il deposito di Castelmauro (Campobasso - 2009)

Nel maggio 2008 l'APAT (oggi ISPRA) descrive la grave situazione determinatasi nel Comune di Castelmauro (Campobasso) per la presenza di un deposito di rifiuti radioattivi all'interno del centro storico. Nell'ottobre dello stesso anno, il Prefetto di Campobasso viene nominato dal Presidente del Consiglio dei Ministri "Commissario delegato per l'assunzione delle occorrenti iniziative straordinarie e urgenti a tutela della pubblica e privata incolumità (art. 126-bis del D.Lgs. 230/95)" finalizzate al trasporto e messa in sicurezza dei fusti contenenti rifiuti radioattivi ubicati nel Comune di Castelmauro e alla bonifica dell'area interessata.

Nucleco, su incarico del Commissario delegato, ha curato la bonifica e messa in sicurezza dei locali in cui erano stati siste-

mati i fusti contenenti rifiuti radioattivi. Al termine di una approfondita fase di caratterizzazione radiologica e di ripristino delle condizioni di sicurezza, i rifiuti sono stati allontanati e trasportati in Nucleco per il loro trattamento. Per la bonifica dell'area e il successivo rilascio sono state effettuate operazioni di caratterizzazione radiologica *in situ* e di decontaminazione delle superfici.



Le due foto mostrano immagini del deposito prima e dopo l'intervento di bonifica

misura radio-chimici da laboratorio quali ad esempio:

- sistemi di spettrometria X/γ,
 - spettrometria α,
- strumenti per scintillazione liquida per la determinazione di α e β emettitori,
- ICP-MS.

Che fine fanno i rifiuti

Completate le attività di caratterizzazione, il rifiuto segue una via differente in funzione della sua natura. Sinteticamente ed operando una necessaria semplificazione, è possibile individuare tre possibili gruppi:

- rifiuti e sorgenti solidi,
- rifiuti liquidi,
- rifiuti con tempi di dimezzamento inferiori ai 75 giorni.

Nel caso dei *rifiuti e sorgenti solidi*, Nucleco dispone di un impianto di trattamento specifico (Figura 3), avente l'obiettivo finale di ridurre i volumi e di immobilizzarli entro una matrice stabile fisicamente e chimicamente. A tale fine i rifiuti, opportunamente confezionati entro fusti petroliferi e selezionati in modo tale da dar luogo a lotti omogenei (cioè che abbiano analoghe caratteristiche chimico-fisiche e radiologiche), sono sottoposti entro tale impianto ad un processo di compattazione attraverso una super-prensa ad elevata potenza (eccettuati i casi in cui tale operazione potrebbe dar luogo ad una compromissione del confinamento stesso della radioattività, come ad esempio accadrebbe nel caso di sorgenti sigillate), dando luogo a delle "pellets" che vengono poi introdotte entro contenitori metallici cilindrici omologati per garantire elevate prestazioni di durevolezza

nel tempo. Entro questi ultimi è, infine, introdotta una malta cementizia qualificata che garantisce stabilità al manufatto finale. L'impianto è dotato di un sistema completamente remotizzato e automatizzato, al fine di ridurre al minimo i pericoli per gli operatori e di garantire lo svolgimento delle attività in condizioni di sicurezza.

Analogamente è presente presso il Centro Ricerche Casaccia un impianto per trattare i *rifiuti liquidi radioattivi* allo scopo di ottenere, a seguito di un'opportuna combinazione di trattamenti elementari di tipo chimico, fisico e biologico, una corrente liquida (chiarificato) radiologicamente e chimicamente conforme ai requisiti richiesti dalla legge per lo scarico della stessa in corsi d'acqua superficiali. Gli inquinanti radioattivi risultano concentrati in fanghi che, dopo eventuali processi di ispessimento, sono sottoposti al condizionamento in matrice cementizia entro contenitori cilindrici omologati.

Sia per quanto riguarda i rifiuti liquidi che i rifiuti e le sorgenti solide, il prodotto finale è pertanto costituito da manufatti, temporaneamente stoccati entro i depositi del Complesso Nucleco, in attesa del loro trasferimento nel Deposito Nazionale di futura realizzazione. I depositi sono periodicamente sottoposti ad attività di monitoraggio e controllo, al fine di verificare la permanenza dello stato di integrità dei manufatti.

Differente è, infine, il caso dei *rifiuti caratterizzati da tempi di dimezzamento inferiore ai 75 giorni* (tipicamente originati da attività di natura bio-medica). I rifiuti appartenenti a questa categoria vengono stoccati in aree idonee, attendendo il tempo necessario affinché i processi di decadimento ne riducano l'attività fino ai livelli al di sotto dei quali possano essere considerati rifiuti non radioattivi, in accordo con le normative vigenti. A seguito di accurati campionamenti e analisi di caratterizzazione, finalizzati alla verifica dell'av-



Fig. 3 Impianto di trattamento Nucleco per rifiuti solidi

venuto decadimento, si procede pertanto alle attività di smaltimento, avvalendosi di operatori autorizzati allo scopo. Oltre al quotidiano impegno nello

svolgimento delle proprie attività in condizioni di sicurezza e di rispetto ambientale, Nucleco rivolge il proprio sguardo al futuro, valutando costantemente i possibili margini di

sviluppo e di miglioramento, investendo nell'ampliamento delle competenze professionali e nell'aggiornamento delle tecniche e dei sistemi adottati.

¹ Si intende per produttore la persona fisica o giuridica che, per lo svolgimento delle proprie attività legalmente autorizzate, utilizza materiali tali da generare rifiuti radioattivi o ha necessità di dismettere sorgenti radioattive



The European In-Kind Contribution to ITER

ITER – “the way” in Latin – is a major step in the development of fusion energy. Its objective is to demonstrate the scientific and technological feasibility of fusion energy. The European Union (including Switzerland), Japan, China, Korea, the Russian Federation, India, and the USA are part of this international scientific project. The ITER machine is under construction at Cadarache in the south of France

DOI 10.12910/EAI2017-067

by **Federico R. Casci**, *Fusion for Energy, Spain*

The ITER Agreement

The ITER Agreement was officially signed in Paris in November 2006 by Ministers from the seven ITER Parties. This document established the detail of the construction, exploitation and decommissioning phases, as well as the financing, organization and staffing of the ITER Organization. From

that moment on, the staff was increased to the current number (about 800 persons), the nuclear licensing process was initiated, site preparatory works were carried out, and procurement agencies in each ITER Party (the Domestic Agencies) were established.

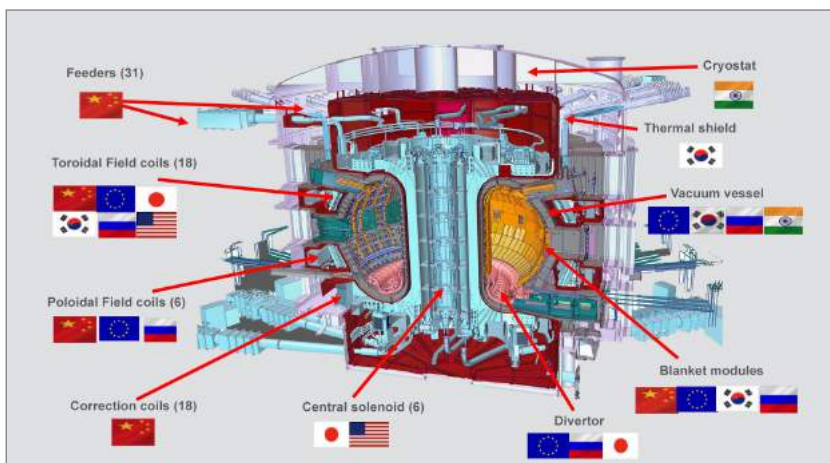


Fig. 1 In-Kind components from ITER Parties
Source: courtesy of ITER IO

Sharing of Procurements

The procurement of the components by the Parties to the ITER project is based on the principle of the in-kind contribution. The components that make up ITER have been divided into 85 procurement “packages” which are distributed among the seven parties to the ITER Agreement (see box) to achieve the agreed level of contribution from each of them. F4E provides, on behalf of Europe, components to ITER that amount to about 45% of the overall value of the project. The obligation of all the Parties is summarized in Figure 1.

The technical specifications and the details of each item to be delivered to the ITER project are included in a Procurement Arrangement (PA) that is signed by the directors of both ITER and of the responsible Domestic Agency (DA), representing the specific ITER Party. The design of the component at the moment of the signature of the PA, when it is handed out to the DA, can be at different levels of development. Therefore the DA work may also include a part of design on top of the manufacturing.

The planning of the work from design, if included, to manufacturing and delivery of the component is constantly updated through a

Fusion is the process that powers the sun and other stars and makes life on Earth possible. It consists in fusing together light atoms (i.e. Deuterium and Tritium – isotopes of Hydrogen) to make heavier ones (i.e. Helium). On earth it is not possible to replicate the extreme pressure within the sun. Consequently, to allow fusion to happen much higher temperatures are necessary, over 100 million degrees. During fusion reactions a small amount of mass is converted into energy, in accordance with Einstein’s well-known equation. The attractiveness of fusion is due to its many advantages. The basic fuels (deuterium and lithium, the

latter used to breed tritium) are abundant, it generates no greenhouse gas emissions and has a low impact on the environment with no long-lasting radioactive waste. Fusion reactors are also inherent safe because meltdown or runaway reactions are impossible.

ITER uses magnetic confinement through very high magnetic fields to give the plasma a toroidal shape inside the machine vessel and to contain it long enough and away from the walls of the container to allow fusion to occur.

The current ITER schedule foresees first plasma at the end of 2025 and the start of full Deuterium-Tritium operations in 2035.

What ITER will do

The amount of fusion energy a tokamak is capable of producing is a direct result of the number of fusion reactions taking place in its core. The larger the vessel, the larger the volume of the plasma and therefore the greater the potential for fusion energy.

The ITER Tokamak will be a unique experimental tool, capable of longer plasmas and better confinement. Due to the presence of tritium and to the production of neutrons, ITER is a nuclear installation under French law, which means that strict safety and quality requirements are obligatory.

ITER main features:

- ITER is designed to produce a ten-fold return on energy ($Q=10$), or 500 MW of fusion power from 50 MW of input power. ITER will not capture the energy it produces as electricity.
- To demonstrate the integrated operation of technologies for a fusion power plant. Scientists will be able to study plasmas under conditions similar to those expected in a future power plant and test key technologies for the future reactor.
- To achieve a deuterium-tritium plasma, a “burning plasma”, one in which the heat from the fusion reaction is confined within the plasma efficiently enough for the reaction to be sustained for a long duration.
- One of the missions for the later stages of ITER operation is to demonstrate the feasibility of producing tritium from lithium in the machine as the world supply of tritium, one of the fuels, is not sufficient to cover the needs of future power plants.
- To demonstrate the safety characteristics of a fusion device, the control of the plasma and of the fusion reactions with negligible consequences to the environment.

detailed schedule that every DA has to provide to the ITER organization on a monthly basis. Milestones, such as design reviews, manufacturing steps, acceptance tests and delivery, are identified and monitored to detect any potential delay and risk that can then be mitigated through specific actions. The ITER Organization is responsible for the specifications and the design of the components. The project defines lifecycle phases (Conceptual Design, Preliminary Design, Final Design and Manufacturing Design), when reviews are carried out together by IO and DAs to confirm the readiness of the component to move to the next phase. The responsibility of the cost of the components lies instead fully on the DAs.

In the specific case of Europe, on the basis of the specifications detailed in the PA, F4E starts a procurement procedure for European industries, sometimes in consortia with fusion laboratories, to competitively bid for the work. F4E

contracts with the tenderer that provides the best offer in terms of quality and/or price. Work, mostly pre-PA investigations and analyses, is also contracted out to European Fusion Laboratories that have the know-how in many scientifically advanced systems (e.g. plasma heating systems, diagnostics) required by the machine.

Europe has budgeted €₂₀₀₈ 6.6bn until the end of 2020 according to the July 2010 decision of the EU Council of which most is earmarked for contracts placed by F4E with European industry, SMEs and research laboratories. The budget to be made available to F4E after 2020 will be discussed at EU level in the forthcoming two years.

The Strategy – from Construction to Operation

The current ITER strategy foresees a ‘Staged Approach’ as a means of improving focus and optimising resources. This involved hav-

ing up to four phases of ITER assembly and operation so as to reduce technical risks (Figure 2). As a consequence, since early 2016, F4E concentrate resources (funding and staff) on the activities critical to the achievement of First Plasma. To that end non-First Plasma projects were either suspended or slowed down in order to make resources available for the critical First Plasma projects and improve the confidence of remaining within the available budget.

In 2016 the ITER Organization obtained approval *ad referendum* (i.e. subject to domestic processes of obtaining approval) of the schedule and the resources covering the full period 2016-2035 with a First Plasma at the end of 2025.

The F4E top-level schedule is underpinned by comprehensive lower-level ‘Detailed Work Schedules’ of approx. 65,000 activities, encompassing the individual activities to be conducted at cost account level.



Fig. 3 Tokamak Building bio-shield under construction
Source: courtesy of ENGAGE

Status of the Contributions to the ITER Project

ITER is under construction in Cadarache in the south of France. Europe as the Host Party and France, as Host State, have specific responsibilities for the success of the Project. Europe bears 45% of the construction cost including all the buildings. It will provide 34% of the cost of operation, deactivation and decommissioning of ITER.

The following subsections present a brief report on the first-of-a-kind technological systems for ITER, some of which are still in the design and development phase, which Europe is responsible for. The ITER schedule requires installation of some of these systems, fully or partially, before First Plasma.

Site and Buildings

Thirty-nine buildings and areas will

house the systems necessary for the operation of ITER. The ‘Tokamak Complex’ will house the main ITER components, and will be one of the largest buildings of its type ever constructed: 60 metres tall (with an additional 20 metres underground), 120 metres long and 80 metres wide; requiring 16,000 tonnes of iron reinforcement bars, 150,000 m³ of concrete and 7,500 tonnes of steel. The two levels of the Tokamak Com-

plex below ground are complete and work is in progress on the other levels, including the thick cylindrical concrete bio-shield which will surround ITER (Figure 3).

Civil construction works on the 60 metres tall Assembly Hall, adjacent to the Tokamak Complex, are complete. Installation of the main cranes in the building, capable of lifting a combined weight of 1,500 tons, was successfully accomplished. Two auxiliary cranes, able to lift 50 tons each, are also in place.

Vacuum Vessel

The ITER plasma, where the fusion reactions will take place, will be held under vacuum inside a special double-walled container, the Vacuum Vessel. This toroidal (i.e. doughnut-shaped) vessel will be twice the size and eight times the volume as that used in the largest existing fusion device: it is over 19 metres across and 11 metres high. It will weigh in excess of 5,000 tonnes, similar to the Eiffel Tower.

Europe is currently responsible to deliver five out of the nine ‘sectors’ of the vessel, the others being manufactured by the Korean Domestic Agency.

The work has progressed with the

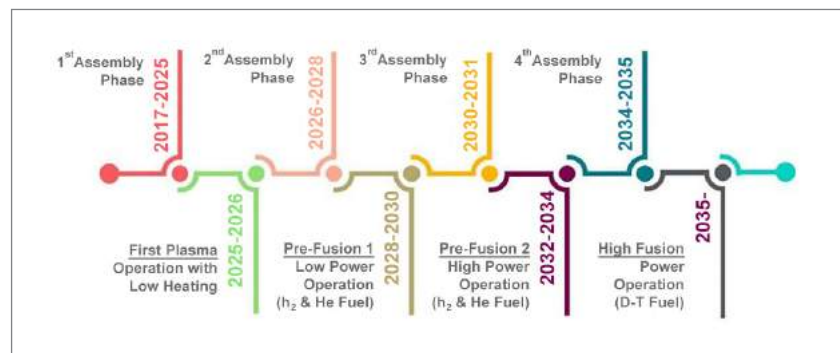


Fig. 2 ITER Staged Approach

completion of the first subassembly early 2017. Manufacturing activities are being carried out at two main locations in Italy as well as in other European countries where main subcontractors are located.

Magnets

A system of 30 superconducting magnetic coils will ‘confine’ (i.e. hold in place) the extremely hot plasma inside ITER and prevent it from touching the walls of the container. These will be among the largest and most powerful superconducting magnetic coils ever made. Europe is responsible for providing 10 of the 19 ‘Toroidal Field’ (TF) coils for ITER, 20% of the Nb₃Sn superconductor used in the TF coils, five of the six ‘Poloidal Field’ (PF) coils, 11% of the NbTi superconductor used in the PF coils and nine ‘pre-compression rings’, which keep the coils in place during operation.

Fabrication and verification of all superconducting strand under the responsibility of Europe is complete (97 tons out of the 500 tons required for ITER) and fabrication of the superconductor itself was completed: 19 kilometres for the Toroidal Field coils and 7 kilometres for the Poloidal Field coils.

As the Toroidal Field coils are concerned, each of them, weighing 310 tonnes, will comprise a superconducting ‘Winding Pack’, mounted in a stainless steel case. To form the Winding Pack, seven smaller modules are stacked together and impregnated with a special resin. In turn, each of these smaller modules consists of a D-shaped stainless steel plate with grooves machined in a spiral path on both sides. The spiral grooves support a 700-metre long length

of superconductor, wound into the required shape, heat-treated and electrically insulated before insertion in the grooves.

In 2016, the first ever Winding Pack was completed (see Figure 4), with the involvement of more than 600 people from at least 26 companies across Europe.

As for the five Poloidal Field coils

which are too big for transportation to the site.

In-Vessel Components

Whilst the ITER magnets will confine most of the hot plasma, some particles and radiation will inevitably escape from this magnetic ‘cage’. To protect the Vacuum Vessel and



Fig. 4 The first-ever Winding Pack for the Toroidal Field coils
Source: courtesy of ASG Superconductors, La Spezia, Italy

under Europe’s responsibility, four are fabricated by European industry in the Poloidal Field coil factory at the ITER site. One will be fabricated in China under F4E contract, using facilities and staff at the Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences-ASIPP. An engineering integrator supports F4E in fabricating the coils manufactured in Europe.

Manufacture and commissioning of the tooling to wind the coils is complete, both in China and at the ITER site. The production line in Cadarache will allow fabrication on site of the largest Poloidal Field coils for ITER, up to 25 metres in diameter,

the external systems from this energy flux, its inside surface will be covered by 440 special blocks, called Blanket Modules.

Each module is made from a Shield block and a First Wall panel. Europe will provide 215 First Wall panels. There is also a device at the bottom of the Vacuum Vessel, called the Divertor, which will allow the removal of the excess heat and plasma ‘ash’ keeping the plasma clean enough to continue operation. This particle flux escaping the plasma is hitting components specially designed to handle very high heat flux. Europe is responsible for many key components of

the Divertor, in particular the Inner Vertical Target and the Cassette Body.

Work is in progress to manufacture and test prototypes for qualification of potential suppliers within European industry of the Blanket First Wall and Divertor components. Notable achievements include the manufacture of two reduced-scale Blanket First Wall prototypes and the successful high heat flux testing of two qualification 'Semi-Prototypes', meeting key milestones in the manufacturing process and the ITER First Wall qualification programme.

Regarding the Divertor components, F4E completed the first stage of the procedure for the qualification of potential suppliers for the 'Inner Vertical Target' with the successful manufacture of mock-ups for high heat flux testing.

Test Blanket Modules

Europe is developing, together with European laboratories and industrial suppliers, two concepts of Test Blanket Module to be tested in the ITER machine. This component is necessary to develop a necessary feature of all future fusion reactors, the generation of their own tritium. The Test Blanket Module is not only a technically complex device but must also operate reliably in an extremely harsh environment (heat, neutrons and magnetic fields).

A recent key achievement was the fabrication of 27 tonnes of EUROFER steel by European industry. EUROFER is a special type of steel, which does not become as radioactive as other steels when exposed to neutron irradiation. Manufacturing of mock-ups and qualification prototypes of the Test Blanket Module will use this steel.

Remote Handling

Remote Handling will play an essential role on ITER once the plasma produces significant radiation from the fusion reactions and robotic tools become necessary to conduct inspections and to repair components close to the device. This is especially challenging since some of the items to be manipulated weigh up to 50 tonnes and all need precision positioning. Europe will provide a significant fraction of the Remote Handling systems on ITER; the Divertor Remote Handling System, the Cask and Plug Remote Handling System, the Neutral Beam Remote Handling System and the In-Vessel Viewing System.

Design work has started for these systems as well as tests of key technologies and components for the Divertor Remote Handling System. A multi-year programme to industrialise state-of-the-art technologies needed for the ITER

Remote Handling systems is in progress.

Cryoplant and Fuel System

The ITER Cryoplant, a complex system and one of the largest of its type in the world, will provide the cryogenic fluids necessary to cool several ITER components, most notably the superconducting magnets. Europe is responsible for the Liquid Nitrogen Plant and Auxiliary Systems, representing about one-half of the Cryoplant, along with part of the network to distribute and regulate the cryogenic fluids; the front-end Cryodistribution lines and Cold Valve Boxes. Some of the components of the plant, such as the large "quench" tanks, have already been delivered to the ITER site.

Europe is also responsible for all the main Cryopumps of ITER, which use cryogenic fluids to keep a high vacuum in, for example, the Vacuum Vessel by condensing-out ('pumping') gases such as oxygen or nitrogen.



Fig. 5 Neutral Beam Test Facility in Padua, Italy
Source: courtesy of Consorzio RFX

One of the fuels for the fusion reaction in ITER will be tritium. As well as being an expensive resource, tritium is radioactive. Careful management and recycling of tritium on ITER is therefore essential. This is the purpose of the Tritium Plant, to be provided by Europe; consisting of a Water Detritiation System and a Hydrogen Isotope Separation System. Six large tanks, forming part of the Water Detritiation System, have already been delivered to the site and installed in the Tokamak Complex. These were the first European in-kind components to be installed on ITER.

Plasma Heating Systems

To create fusion in ITER, the plasma needs to reach over 100 million degrees. By passing a large electrical current through the plasma, which also helps to hold it in a magnetic 'cage', it is possible to reach 20-30 million degrees. Since this is not enough on its own, ITER relies on three additional heating systems to increase the temperature to the required value.

Neutral beam heating & current drive - One of the most reliable ways to heat plasmas in present-day fusion experiments is to fire a beam of fast, uncharged particles into the plasma – called Neutral Beam Injection. ITER will have two (or three if needed) Neutral Beam Injectors and Europe is responsible for providing most of their components. Neutral Beam Injectors work by generating an electrically charged form of Deuterium ('ions') in an 'ion source'. A high voltage accelerates a beam of these ions to a high energy. Collisions with Deuterium gas neutral-

ise ions in the beam to create the high-energy neutral beam.

To develop and test the Neutral Beam Injectors a dedicated facility is under construction in Padua, Italy – the Neutral Beam Test Facility (Figure 5). The facility, which includes also in-kind contributions from Japan and India, hosts two test beds:

- SPIDER (Source for Production of Ions of Deuterium Extracted from Radio Frequency plasma) where the ion source will be tested up to an acceleration voltage of 100,000 volts; and
- MITICA (Megavolt ITER Injector & Concept Advancement) which will test the injector up to the full acceleration voltage of one megavolt (1 MV) and power of 16.5 megawatts (16.5 MW).

Installation is complete of most of the SPIDER components and the start of experiments is foreseen in 2018. As for MITICA, manufacturing of all the main components has mostly started and the start of the experiments is foreseen in 2021.

Radiofrequency Heating System - Another way to heat up the plasma is to use radio waves to make the ions and electrons in the plasma vibrate. ITER is using two systems: Ion Cyclotron Heating, which heats the ions, and Electron Cyclotron Heating, which heats the electrons. Each system comprises power supplies, radio wave generators, transmission lines to transport the radio waves and antennae inside the Vacuum Vessel to launch them into the plasma. Water-cooled, stainless steel 'port plugs' house both the Electron Cyclotron Heating and Ion Cyclotron

Heating antennas and couple them to the Vacuum Vessel.

Europe is responsible for providing two equatorial port plugs (each housing one Ion Cyclotron Antenna) and four upper port plugs (each housing one Electron Cyclotron Upper Launcher), together with ex-vessel components of both the Electron Cyclotron Upper and Equatorial Launchers and control systems for the Electron Cyclotron plant and Upper Launchers.

Europe is also responsible for providing eight sets of power supplies for the Electron Cyclotron Heating system and six gyrotrons, with their superconducting magnets and auxiliaries.

Gyrotrons are high power radio wave generators in the mm-wave region of the electromagnetic spectrum. Factory acceptance testing is underway for the first Electron Cyclotron power supply unit and initial testing of a gyrotron manufactured by European industry is meeting its performance targets.

Plasma Diagnostics System

Operating ITER successfully will require the availability of comprehensive information on the behaviour of the fusion plasma. This information will allow the safe operation of ITER, optimisation of the plasma configuration for maximum performance and comparisons between that performance and our theoretical understanding. Around fifty different systems ('Diagnostics') will measure parameters of the plasma, together with those of the First Wall Blanket Modules and Divertor. Europe is responsible for twelve Diagnostics and eight ancillary systems. So far, 28 European research laboratories and 20 Europe-

an SMEs are involved in the design, development and/or manufacture of these systems.

Conclusions

As Europe's Domestic Agency for ITER, F4E is contributing to most of the core components of the tokamak and the ancillary systems. A First Plasma is cur-

rently foreseen at the end of 2025. The work is in progress both at the site and in the European Industry and laboratories to provide the agreed in-kind contributions to the project. Since 2007 contracts and grants have been placed by F4E with industries and research organisations reaching by the end of 2016 a total investment of about € 3.7bn spread all over Europe.

Acknowledgments

F4E acknowledges the close collaboration with the ITER Organization and the other Domestic Agencies in the progress of the ITER project.

*For further information,
please contact:
Federico.Casci@f4e.europa.eu*

Fusion Power Plants

Developing fusion energy as a new source of energy represents a considerable challenge. The European Union, together with all ITER Parties, is currently engaged in the construction of the ITER device, which represents a scientific and technical undertaking of unprecedented magnitude. Successful ITER operation will demonstrate the scientific feasibility of fusion energy, leading to the construction of one or more DEMOs to demonstrate the technological and economic viability of fusion power

DOI 10.12910/EAI2017-068

by **David Maisonnier**, *European Commission*

The main focus of the European Fusion Research Programme in the field of thermonuclear fusion is the construction of ITER [1]. This is also the case for the other ITER Parties, namely China, India, Japan, Korea, the Russian Federation and the United States of America. ITER is indeed the main pillar of the European Roadmap for the Realisation of Fusion Energy [2], which outlines the European strategy between now and 2050.

The European Fusion Roadmap

ITER is expected to achieve most of the important milestones on the path to the first Fusion Power

Plant (FPP), notably the qualification of a robust physics basis and the validation of key nuclear technologies, and the licensing of ITER will confirm the intrinsic safety features of fusion. Thus, ITER's success remains the most important overarching objective of the European fusion programme and the majority of the European Union's resources¹ on fusion are currently devoted to ensure that ITER is built within scope, time and budget. Significant resources are also expected to be devoted to ITER in the future to ensure completion of construction, to prepare future operation, and to train a new generation of scientists and engineers for its exploitation.

The European Fusion Roadmap foresees only one step, called DEMO, between ITER and the first FPP, in order to bridge the engineering and technological gaps between ITER and the first FPP. The main goals of DEMO are: (i) to produce net electricity for the grid at the level of a few hundred megawatts (MWs); (ii) to breed the amount of tritium needed to close its fuel cycle; and (iii) to demonstrate all the technologies for the construction of a commercial FPP, including an adequate level of availability.

DEMO (Figure 1) will require a significant amount of innovation in critical areas such as heat exhaust, materials and tritium breeding to demonstrate the technological fea-

sibility of fusion power as an energy source. On the other hand, to design DEMO on the basis of the ultimate technical solutions in each area would postpone the realisation of fusion indefinitely. For this reason, a pragmatic approach is advocated in the Fusion Roadmap.

Both ITER and DEMO are tokamak devices, i.e. devices that use a powerful magnetic field to confine a plasma in the shape of a torus. There are other types of magnetic confinement schemes to contain the plasma, and the European Roadmap considers the stellarator as a possible long-term alternative to tokamaks. A stellarator is more complex than a tokamak from the engineering standpoint but it operates inherently steady-state (see below the discussion on steady-state operation in a tokamak).

Tokamaks and stellarators are devices that belong to the Magnetic Fusion Energy approach to generating fusion power by using magnetic fields to confine the hot fusion fuel in the form of a plasma. Magnetic confinement is one of two major branches of fusion energy research, the other being Inertial Confinement Fusion (ICF). The aim of ICF is to initiate nuclear fusion reactions by heating and compressing fuel pellets with very powerful laser beams. Because of its potential military applications, the European Union is not supporting this alternative line of research².

Fusion Power Plants

ITER and DEMO are the main devices foreseen to acquire the knowledge necessary to build the first FPP (Figure 2). To define the objectives of these devices it is necessary to define the requirements of a FPP is,

and this is the scope of the so-called 'reactor studies'. Following a series of preparatory activities in the 1990's, Europe performed a Power Plant Conceptual Study (PPCS) between 2001 and 2005 [3], and the five FPP tokamak models developed during the PPCS still constitute the European references. Major studies have also been performed in the USA since the early 1990's: the so-called ARIES studies [4].

What is the scientific gap between our knowledge today and the knowledge required to build the first FPP? The JET tokamak in Culham, UK, which is the most successful tokamak in operation today, has achieved an 'energy amplification factor' Q of 0.67, meaning that it produced 0.67 units of fusion power for 1 energy unit injected into the plasma. The main scientific goal of ITER is to achieve $Q=10$, i.e. ITER will produce 10 times more fusion power than the heating power required to sustain the plasma. Achieving this goal will demonstrate the scientific feasibility of fusion power. JET achieved $Q=0.67$ during a few, short pulses a few seconds long, ITER will achieve $Q=10$ on a regular basis with pulses 400s long. ITER is indeed the first fusion nuclear facility, classified as 'Installation Nucléaire de Base' number 174 by the French Nuclear Safety Authority.

The PPCS indicated that it is possible to conceive a FPP considering only modest extrapolations with respect to the ITER physics basis. The PPCS also highlighted the benefits resulting from a more advanced physics basis, allowing to consider either a smaller device to deliver the same output power or more power from a device of the same size, both resulting in a lower Cost of Electricity.

There are different routes that can be pursued to make progress towards developing concepts that allow for smaller devices. For instance, it would be particularly advantageous if the so-called 'energy confinement time', τ_E , of the plasma could be improved. It is a key parameter, given by the ratio of plasma energy and the power needed to maintain the energy of the plasma in a steady state, and it measures the 'thermal insulation' of the plasma. The main cause for energy leaking out of a tokamak plasma and limiting τ_E is micro turbulence, i.e. small excursions of particles and fields in the plasma away from their equilibrium values, resulting in a net outward flow of energy.

The reason tokamak reactors need to be large is that increasing the size enhances τ_E (this is analogous to putting on another blanket over a bed when it is cold). However, if scenarios can be developed that yield improved energy confinement at a given size (analogous to making the blanket in the bed more effective, e.g. using wool rather than cotton), it would be possible to design smaller fusion reactors. This is possible under certain circumstances, by tailoring the profile of the current flowing through the plasma. In this case it is possible to induce a transition to a state whereby the plasma develops a narrow layer in its middle region where the micro turbulence is strongly reduced. This acts like a bottle neck for the outflow of energy and inside this layer the plasma temperature and density can be greatly enhanced, resulting in an improved energy confinement. Furthermore, the strong gradients in plasma pressure associated with the region of reduced turbulence lead to a self-generated current, called the 'bootstrap current', that can potentially

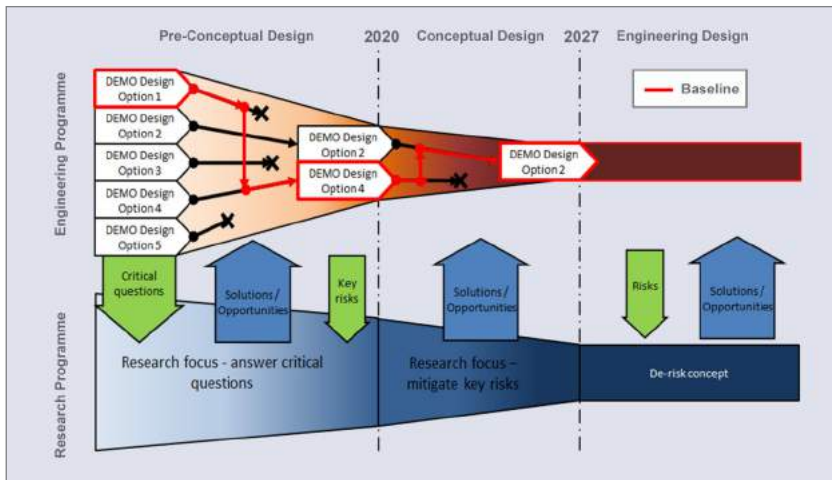


Fig. 1 DEMO development in Europe, proposed plan for the next 10 years according to the latest revision of the Fusion Roadmap
 Source: courtesy of EUROfusion

account for a significant fraction of the current needed for the plasma confinement in a tokamak. This kind of scenario with a region of reduced turbulence in the mid-range of the plasma is often called an advanced scenario, and its development will require dedicated machines such as JT60-60, currently under construction in Japan under the framework of the bilateral agreement between EURATOM and Japan [5].

The European Power Plant Conceptual Study

The major requirements to be satisfied by a FPP, developed in cooperation with European Industry at the beginning of the PPCS, were:

Safety and waste disposal:

- no need for an emergency evacuation plan, under any accident driven by in-plant energies or due to the conceivable impact of ex-plant energies;
- no active systems required to achieve a safe shutdown state;

- no structure should approach its melting temperature under any accidental conditions;
- adopt 'defence in depth' and, in general, ALARA (As Low As Reasonably Achievable) principles as widely as possible;

- minimise the production of radioactive waste, with no waste requiring geological disposal after an intermediate storage of less than 100 years.

Operation:

- operation should be steady state with power of about 1 GWe for base load;
- lifetime should be about 40 years with the possibility of further extension up to 60 years for parts which are not replaceable;
- maintenance procedures and reliability should be compatible with a plant availability of 75–80%.

Economics:

- since public acceptance is becoming more important than economics, economic comparison should be made with energy sources with comparable acceptability.

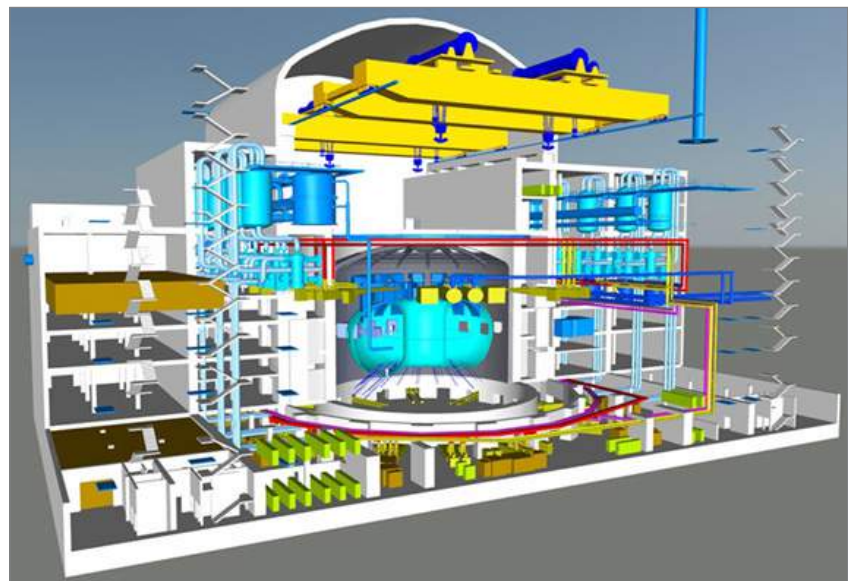


Fig. 2 Conceptual layout of Fusion Power Plant. The overall building size is comparable to that of a fission plant of similar power production capacity
 Source: courtesy of EUROfusion

The PPCS confirmed that it was possible for future tokamak FPPs to satisfy these requirements and concluded that even the models developed assuming limited extrapolations could be economically acceptable with major safety and environmental advantages. It is important to note that later studies confirmed these findings. The PPCS also highlighted the engineering and technological challenges to be resolved before considering the construction of the first FPP.

DEMO and the main challenges of Fusion Technology

The DEMO studies currently underway [6] aim at addressing all critical issues identified during the PPCS. A plasma is an electrical conductor. It is therefore possible to induce an electric current in it by slowly increasing the current through the electromagnetic winding constituting the so-called Central Solenoid coil (Figure 3), which is inherently a pulsed process. Steady-state operation in a tokamak requires driving the plasma current non-inductively with the help of systems able to inject considerable power into the plasma, either by injecting 1 or 2 MeV neutral beams into the plasma or by heating the electrons or the ions using Electron or Ion Cyclotron Resonant Heating at frequencies of, respectively, 170 GHz and 50 MHz. Because of the low plug efficiency of these systems, i.e. the ratio between the total energy required to operate these systems and the energy eventually injected into the plasma, operating a tokamak steady-state would require to recirculate a considerable fraction of the electricity generated – of the order of several 100's of MW for a gross electricity production of

ca. 2 GWe, resulting in a net power output between 1 and 1.5 GWe (the exact figure depends from other design choices, in particular the primary reactor coolant, water or helium). On the other hand, plasma discharges of several hours duration, with short interruptions of ca. 10-20 minutes between them, should be possible with less than 100 MW of additional power injected into the plasma. The current preference today, at least in Europe, is therefore to consider pulsed or, more accurately, quasi-continuous operation for DEMO.

Achieving a high availability will be a major challenge of fusion power. Indeed, the high energy neutrons (14 MeV) produced during the deuterium-tritium fusion reaction will activate the whole core of the FPP reactor, thereby imposing the use of robotics technologies for all maintenance operations inside the main reactor vessel and for most maintenance operations within the secondary vacuum vessel (the cryostat). Handling components weighting up to 100 tons and positioning them with millimetric accuracy are tasks well beyond the current state-of-the-art. In-vessel maintenance operations in ITER will already require the use of robotics technologies and will constitute a major feasibility demonstration for the deployment of these technologies in a fusion environment. Any intervention inside the main reactor vessel will require several weeks before and after the intervention proper to free the access path for the remote devices and to condition the machine – e.g. detritiation before the intervention and first wall conditioning after the intervention. In other words, any intervention will last at least 3 or more months. To achieve a reasonable

availability, it is therefore essential to aim for the highest possible reliability of the major reactor components and systems to minimise the number of remote interventions, scheduled and unscheduled.

The fuel used in the fusion reaction is a mixture of deuterium and tritium, both hydrogen isotopes. The natural abundance of deuterium in hydrogen is one part per 6500, but tritium is virtually non-existent in nature because of its relatively short

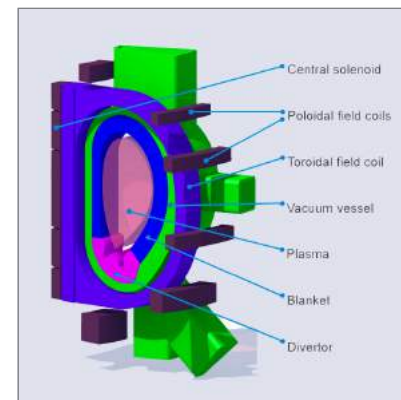


Fig. 3 3D view of the main components of a tokamak power plant: the 3 coil systems – central solenoid, toroidal field coils and poloidal field coils; the main – or primary – vacuum vessel; the blanket – where tritium will be bred and where most of the energy carried by the neutrons produced by the fusion reaction will be captured; the divertor – the key component for the power exhaust; and the plasma itself
Source: courtesy of EUROfusion

half-life of 12.3 years. Tritium must therefore be produced, and the preferred scheme is to 'breed' tritium in DEMO and in the FPP from lithium. Lithium³ or lithium compounds will be placed in the 'blanket', the component located inside the main vessel of the FPP and surrounding the plasma. Tritium breeding is one of the major technological challenges of fusion technology and, again, ITER is the essential facility in the

strategy for the development of reactor-relevant breeding blankets: different Tritium Breeding Modules will be installed and tested in ITER in order to assess and qualify possible tritium breeding processes.

In a fusion plasma, the energy injected to heat the plasma and the energy produced by the fusion reaction must be removed from the system at the rate at which they are created, the impurities released from the reactor inner walls must not inhibit the fusion reaction and must be removed, and the reactor itself, primarily the inner walls, must not be damaged by the fusion reaction or by the power exhaust processes. These three considerations define the power exhaust issue. To quantify the problem, consider the global power balance in a FPP with 100 MW of auxiliary heating power and generating 1.5 GW of fusion power. Since 80% of the D-T fusion power is released in the form of neutrons, this leaves $100 + 300 = 400$ MW transferred to the plasma. Assuming that a substantial fraction of this power – say 50% for the first FPP, although a percentage in excess of 80% can be achieved with advanced scenarios – can be radiated in the core of the plasma by bremsstrahlung, synchrotron and line radiation, 200 MW will have to be exhausted by the reactor ‘first wall’ and 200 MW by the ‘divertor’. In addition to significant physics issues related to the core radiation and to the transport of power to the divertor

region, power exhaust imposes very stringent materials requirements.

Fusion Materials

The last major challenge of fusion energy is the development of functional and structural materials able to resist the harsh nuclear environment. Materials developed for fission applications may not be suitable because the ratio of He production (in atomic parts per million—appm) to dpa (displacement per atom) will differ considerably. For instance, the ratio in steels will be approximately 40 times higher in a FPP and in DEMO and the corresponding gas-production level is expected to enhance swelling and brittleness of the materials. Therefore, EUROFER steel – a reduced-activation ferritic-martensitic steel – was developed specifically for fusion applications to minimise the corresponding degradation of properties and to reduce its activation level in order to limit the amount of radioactive waste generated in a FPP. Another challenge for the materials facing the plasma is the extreme heat loads in some specific regions, up to 10-20 MW/m², leading to the use of tungsten as both structural material and armour protection material. This heat-load is comparable to the highest loaded part of the space shuttle during re-entry in the atmosphere (10 MW/m² for a few minutes only).

In DEMO the structural material of the blanket will have to operate up to 20 dpa during phase 1 and, after replacement of the complete blanket, up to 50 dpa during phase 2. In a FPP the blanket has a target limit of 100-150 dpa, corresponding to 5 full-power-year of operation. A significant R&D programme is in progress in Europe and in all countries with an important fusion development programme to develop and to qualify suitable materials.

Conclusions

Developing fusion energy as a new source of energy represents a considerable challenge. The European Union, together with all ITER Parties, is currently engaged in the construction of the ITER device, which represents a scientific and technical undertaking of unprecedented magnitude. Successful ITER operation will demonstrate the scientific feasibility of fusion energy, leading to the construction of one or more DEMOs to demonstrate the technological and economic viability of fusion power. The development of fusion power plants model is an essential activity in the overall fusion development strategy, necessary to identify the long-term R&D programmes that must be launched today.

*For further information,
please contact:
david.maisonniere@ec.europa.eu*

¹ ITER is currently financed through the EU Multiannual Financial Framework 2014-2020 whilst the EU Fusion Research Programme, in addition to ITER, is financed through the Framework Programme Horizon 2020

² A small number of fusion start-up companies have been set up in North America and in the EU during the last few years investigating alternative concepts to achieve the production of energy from fusion with smaller devices and with a faster timescale. The physics and technological bases considered are not always clearly defined and, when they are, they rely on some extreme – although theoretically possible – assumptions. The creation of these start-ups demonstrates however the growing interest of private capital in fusion energy

³ The U.S. Geological Survey produced in 2015 a worldwide estimate of lithium ‘reserves’ of 13.5 million tons and 39.5 million tons of ‘resources’, which is a less firm category than ‘reserves.’ Forecasts about the availability of lithium for FPP are strongly dependent on the hypotheses related to lithium use in other areas, in particular batteries. However, the total lithium content of seawater is very large and is estimated as 230 billion tonnes, where the element exists at a relatively constant concentration of 0.14 to 0.25 parts per million

REFERENCES

1. <https://www.iter.org/>
2. Fusion Electricity, a roadmap to the realisation of fusion energy, <https://www.euro-fusion.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>
3. D. Maisonnier, Power plant conceptual studies in Europe, *Nuclear Fusion* 47 (2007) <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0029-5515/47/11/014>
4. <http://www-ferp.ucsd.edu/ARIES/DOCS/bib.shtml>
5. V. Tomarchio et al., Status of the JT-60SA project: An overview on fabrication, assembly and future exploitation, *Fusion Engineering & Design* 123 (2017), <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379617305859>
6. G. Federici et al., Overview of the design approach and prioritization of R&D activities towards an EU DEMO, *Fusion Engineering & Design* 109 (2016), <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379615303835>



The Thermonuclear Fusion Lesson

The paper analyses some of the aspects developing during the period 1997-2008 in which the Author has been involved in SERF Programme (Socio Economic Impact of Fusion) as Italian responsible of Public acceptance and communication process of ITER at moment in construction in Cadarache France. In particular Public acceptance of technology and communication process shall be take into account

DOI 10.12910/EAI2017-069

by **Gaetano Borrelli**, *ENEA*

Public acceptance and communication for large technological plants is not always fully recognized. Nevertheless, fusion energy and its social environment is a very interesting example. The management, or rather governance, of large technical systems has attracted great attention in recent years, as well as the relationship between experts, politicians and the public.

Public acceptance and communication process

The main activity in the field of fusion public acceptance has been realised inside SERF programme the so-called Porto Torres project, which had two main objectives:

- to focus the participation processes more specifically on the topic of fusion, in order to get specific answers to its social, cultural, economic and environmental acceptability;
- to identify better strategies of local development compatible with the installation of a large fusion demonstration facility.

The first phase of SERF studies had demonstrated that such an installation is more acceptable if composite (instead of mono-cultural) development perspectives are proposed to the local population: fusion has better chances to be accepted if it is proposed within *et-et* instead of *aut-aut* solutions (Borrelli et al. 2000, Lackner et al. 2001).

Having shown the readiness of the local community to develop their town with the help of high tech, it had to be determined under which conditions this development could go along with the installation of a

large experimental facility. The Porto Torres project developed through three steps:

- a comparison of the socio-economic situation of Porto Torres with Culham (UK), where the JET laboratory is operational since 1983 (“indirect approach”);
- a visit of a delegation of citizens of Porto Torres to the JET laboratory and their meeting with representatives of the local community in Culham (UK) (“direct experiences”);
- the participation of representatives of the local communities of Porto Torres in a Strategic Scenario Workshop: in this adaptation of the European Awareness Scenario Workshop (EASW) to the new local conditions, citizens discussed possible local future development scenarios with or without the construction of a large fusion demonstration facility and became aware of the consequences of either choice (Borrelli et al. 2000, Lackner et al. 2001)

The presence and participation in this phase was higher both at the public hearings and at the final awareness workshops. This increase of public participation is linked to a deeper awareness in the whole local community. As to the final identification of the acceptance factors for ITER in Porto Torres the environmental compatibility seemed to be the most important element to accept the project.

The second important aspect was information and communication, which must be large, complete and continuous. Economic factors were ranked third; they indicate that the implementation of the project must improve the local economic devel-

opment (Borrelli et al. 2000, Lackner et al. 2001).

As consequence of Porto Torres Project, a study was carried out which focused on public participation, namely on the format of citizen panels and consensus conferences to relevant technological issues and also looked at trust and confidence from the public in socio-technological systems, regarding the often rather cautious or often even hostile reaction of the public towards political decisions about new technologies or site procedures of plants which are regarded as unduly risky. The problem of communicating technical and environmental risks and building up a proper atmosphere of social trust in the responsible decision-makers and decision processes, public authorities and regulating bodies has gained great scientific interest during the last decades (Gazsó et al. 2004).

In 2003 a study on the awareness of fusion in schools across Europe was conducted by ENEA, investigating the effectiveness of informative processes and of the communication connected with the awareness of fusion technology. Questions like “How much is the communication on nuclear fusion in general, and on ITER in particular, comprehensible?” or “Does the communication support learning about the subject or does it cause alienation?” were to be addressed in this study. After providing information and communication to the students, they were asked to fill in a questionnaire, investigating the communicative, cognitive and emotional dimension of the issue at stake. It was realised that the role of teachers is very important to understand the communication on energy and fusion. They are important in this kind of activities to reach and to

involve more potentially interested students. Teachers proposed some useful suggestions, e.g. that information material should be accompanied with lessons of experts. The activity clearly showed that energy is not only a technical problem, but it is also a social problem. When students can say their opinion, such an activity can reduce the gap between the scientific world and every-day life and stimulate critical thought towards the energy topic. The lesson learnt from the whole experience carried out was that when a new technological innovation is communicated in a participative way giving clear information, its acceptability increases (Bonfà et al. 2003).

Lesson by fusion

On the basis of the above-mentioned experiences, we can affirm that activity on fusion has been useful for participatory and communication studies too. The same difficulties encountered in thermonuclear fusion studies have also been found in other studies related to the social acceptance of technologies, i.e. power plants' waste management.

- It is very difficult to implement a participation process about those technologies: for what concerns fusion, its image is strictly perceived in association with the theme of nuclear fission. We must spend a lot of time to arrive to a separation between fusion technology and fission technology.
- For what concerns participation processes we must take into account that a process of mistrust toward scientific experts and scientific institutions is in act.
- Nevertheless, it is our opinion that a development project needs

public participation because of the high social costs derived by public opposition.

- Moreover, we can affirm that the political situation inside industrialised critical areas, Porto Torres is one of more significant case in Italy, requests a process of involvement of citizens and local administrators. Without the implementation of this process it is not possible to promote any technological enterprise.

Faced with these issues we feel we can affirm that the methodologies we put in place in SERF Project has proved to be very effective in general. In fact, we can say we have brought our research tasks to an end and that four issues emerge strongly:

- The strong need for participation in decision processes expressed by local populations;
- The fundamental role played by local actors in stimulating and managing such participation processes (i.e. the University as the first intermediary with the local territory and the local administration - in the person of the Mayor, in particular - as the first interlocutor with whom it is possible to develop strategies for adequate action) and thus by the network that can be developed starting from those primary actors;
- The role played by participants in the workshop: they were chosen according to their role in the local community and now they are important allies for our work: they are the strategic knots of a network that extends itself to the whole of the community. If they perceived the importance they have they are more than willing to collaborate;

- The need for strategies of development that are not monocultural, but that can be configured according to composite development visions.

Conclusion

Besides fusion experience we think that a new stage of the project needs to be put in action with three main objectives:

- To continue the participation process that has been started, by adopting the same methods that have been adopted up to now and that have proved successful: that would be a further test for such tools and can lead to possible amelioration and would enable us to keep the network we have built up to now.
- To focus such participation processes and the methods involved on the topic of fusion and high technology more specifically than it has been focused up to now, to get specific answers about the social, cultural, economic and environmental acceptability of issues related to those issues.
- To identify strategies of development compatible with large-scale technological facilities. Our evidence shows that the acceptability of a project is higher if composite development perspectives are proposed to local population instead of monocultural development.

In conclusion in relation to Fish-off's stages to risk communication, we notice that one of the first steps is information, while the last one states: "All we have to do is make them partners". Our experience shows that we must turn this vision upside-down. We have started

from the last step and now we think we have reached a good level of trust and mutual respect with local populations as well as a sufficient level of information, what we need to do now is to keep and eventually reinforce trust and mutual respect and now to reinforce information more specifically about high technologies, numbers and all the rest they need to participate in a really democratic process. In order to attain such trust what we did was to call local population to discuss as experts themselves, because they really are the first experts of the territory in which they live. We cannot keep thinking that we are the side of society that owns the knowledge: starting from this point of view has proved unsuccessful in previous experiences. Besides, if you want

to have partners some kind of parity has to be established and that starts from our recognition of our limits and from the recognition of the knowledge possessed by local populations about their own reality. If we do this, we are already on the right track. Evidence confirmed our hypothesis that this can happen if local socio-cultural specificity is adequately considered and that this gives the possibility to elaborate forms of composite development with reference to social, economic cultural and environmental factors within an approach that must be verified every time (i. e. an adaptable approach developed out of rigid models). The general indication for such a flexible approach regards the role of local actors that must be seen as such and not only

as mediators. More in particular, local administrators are to be the first interlocutors with whom it is possible to develop a common method because they are the first interpreters of the reality they live in. In accordance with them it is possible to develop instruments to enable citizens to take decision on their own, and, most of all, to understand what kind of guarantees do citizens want about the arena in which discussion takes place and about the actors involved.

Discussion on fusion, like discussion on other new technology issue, cannot avoid social conflict. Our experience shows that, instead of avoiding it or to directing it, it is possible to manage social conflict to make it productive in terms of social composite development.

REFERENCES

1. Baumann M. and Eherer C., (2006). Fusion Power in the Global Energy System. Report on EFDA task TW4-TRE-FESO/A, University of Technology Graz, EFDA
2. Borrelli G. et al., Study of communication following the agreement on the European site for ITER and its impact in terms of public opinion, ENEA 2007
3. Borrelli G., Guzzo T., (2011), *Tecnologia, rischio e ambiente*, Bonanno Editore, Acireale
4. Douglas M. & Wildavsky A., (1982), *Risk and Culture. An Essay on Selection of Technical and Environmental Dangers*, University of California Press
5. Fischhoff, B, et al, (2001), *Risk Communication: A Mental Models Approach*, Paperback
6. Lackner K., Borrelli G., Cook I., Hamacher T., Lako P., Saez R., Tosato G.C. and Ward, D.J. (2001), Socio-Economic Research on Fusion: Summary of EU Research 1997-2000, EFDA-RE-RE-1, EFDA

I rifiuti nucleari ad alta attività verso un deposito geologico condiviso

La sistemazione dei rifiuti nucleari è uno degli argomenti meno conosciuti dall'opinione pubblica e uno dei più sfidanti che un'intera filiera produttiva di un comparto industriale possa registrare

DOI 10.12910/EAI2017-070

di **Oswaldo Aronica, Giorgio Giorgiantoni, Mauro Olivetti e Fabrizio Pisacane**, *ENEA*

L'industria nucleare, fin dagli inizi, si è preoccupata della sistemazione dei propri rifiuti come parte integrante del ciclo del combustibile, ai fini della sicura chiusura dello stesso, con l'ottica della salvaguardia degli addetti ai lavori, delle popolazioni e dell'ambiente interessati. Tali rifiuti sono oggetto di rigorosa attenzione da parte di organismi sovranazionali quali IAEA (*International Atomic Energy Agency*) ed EURATOM (Comunità europea dell'energia atomica), di organi regolatori nazionali, di istituti scientifici di ricerca, di agenzie di protezione dell'ambiente e di vere e proprie realtà industriali. La gestione dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita necessita innanzitutto di un sistema regolatorio solido e autorevole e di

una classificazione chiara e tecnicamente applicabile: il Decreto del Ministero dell'Ambiente e del Ministero dello Sviluppo Economico 7 agosto 2015, emanato ai sensi del Decreto Legislativo n. 45/2014, allinea la normativa italiana alle raccomandazioni IAEA [1], che si propongono di dare alle classificazioni nazionali un inquadramento più uniforme. Va sottolineato che l'ottica degli organismi di regolamentazione nazionali è quella di cercare di non penalizzare gli attori nazionali, siano essi pubblici (con ricadute sui contribuenti) o privati, limitando i possibili extracosti derivanti dalla adozione di nuove normative e di criteri di condizionamento e stoccaggio che devono essere coerenti con quelli di accettazione di un deposito.

La Direttiva EURATOM, cui la normativa italiana si ispira, prescrive sia l'adozione di politiche di gestione, nell'ottica di non lasciare oneri alle future generazioni, e sia la presenza di un'Autorità di regolamentazione nazionale indipendente e competente in materia di sicurezza della gestione del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi [2].

La classificazione dei rifiuti

Il citato decreto del 7 agosto 2015 classifica i rifiuti radioattivi in base alla loro destinazione finale (cfr. Tabella 1), puntando l'attenzione sulla gestione a breve o a lungo termine dei rifiuti.

Mentre per i rifiuti a bassa attività e la maggior parte di quelli a media è prevista la custodia in impianti su-



perficiale o subsuperficiale per qualche secolo (tipicamente 300-500 anni per renderli inoffensivi), nel caso dei rifiuti ad alta attività vengono presi in considerazione impianti in formazioni geologiche di sicura affidabilità. La caratteristica “geologica” prevede una stabilità al di là dell’intervento e della custodia umana, affidata alle caratteristiche morfologiche della regione e che consenta il decadimento dei radionuclidi fino ad essere ininfluenti sull’ambiente circostante.

La quantità di rifiuti nucleari classificati come alta attività (HLW, compresa la frazione di media attività, ILW, per la quale è prevista l’opzione di immagazzinamento temporaneo in attesa dello smaltimento in

formazione geologica) ammontava al 2013, nel mondo, a 2.774.000 m³ (IAEA 2013 NEWDB database), escludendo il combustibile irraggiato SF (Spent Fuel) che ammonta a tutt’oggi a circa 340.000 MTHM (Metric Tons of Heavy Metal).

Per fissare gli ordini di grandezza, la quantità di rifiuti industriali e civili è migliaia di volte maggiore e se ne ha un controllo solamente parziale.

Gli HLW, per la quasi totalità esito del “bruciamento” del combustibile in un reattore nucleare, contengono prodotti di fissione ed elementi transuranici generati nel nocciolo, sono altamente radioattivi, hanno bisogno di schermatura e raffreddamento, e contengono il 95% della radioattività generata durante la produzione di

energia elettrica. Gli HLW, che hanno tempi di decadimento dell’ordine di decine e centinaia di migliaia di anni, sono di tre tipologie:

- combustibile irraggiato;
- rifiuti derivanti dal processo di ritrattamento del combustibile irraggiato;
- frazione dei materiali prodotti dal decommissioning delle centrali nucleari.

In alternativa allo smaltimento diretto si può procedere con il riprocessamento del combustibile esausto in modo da ridurre la quantità di rifiuti da smaltire in formazioni geologiche e recuperare parte per realizzare nuovo combustibile: considerazioni

Categoria	Condizioni e/o Concentrazioni di attività	Destinazione finale
Esenti	<ul style="list-style-type: none"> • Art. 154 comma 2 del D.Lgs n. 230/1995 • Art. 30 o art. 154 comma 3-bis del D.Lgs n. 230/1995 	Rispetto delle disposizioni del D.Lgs. n. 152/2006
A vita media molto breve	<ul style="list-style-type: none"> • T1/2 < 100 giorni Raggiungimento in 5 anni delle condizioni: • Art. 154 comma 2 del D.Lgs n. 230/1995 • Art. 30 o art. 154 comma 3-bis del D.Lgs n. 230/1995 	Stoccaggio temporaneo (art.33 D.Lgs n. 230/1995) e smaltimento nel rispetto delle disposizioni del D.Lgs. n. 152/2006
Attività molto bassa	<ul style="list-style-type: none"> • ≤ 100 Bq/g (di cui alfa ≤ 10 Bq/g) 	Raggiungimento in T ≤ 10 anni della condizione: <ul style="list-style-type: none"> • Art. 30 o art. 154 comma 3-bis del D.Lgs n. 230/1995 Non raggiungimento in T ≤ 10 anni della condizione: <ul style="list-style-type: none"> • Art. 30 o art. 154 comma 3-bis del D.Lgs n. 230/1995
Bassa attività	<ul style="list-style-type: none"> • radionuclidi a vita breve ≤ 5 MBq/g • Ni59-Ni63 ≤ 40 kBq/g • radionuclidi a lunga vita ≤ 400 Bq/g 	Impianti di smaltimento superficiali, o a piccola profondità, con barriere ingegneristiche (Deposito Nazionale D.Lgs n. 31/2010)
Media attività	<ul style="list-style-type: none"> • radionuclidi a vita breve >5 MBq/g • Ni59-Ni63 > 40 kBq/g • radionuclidi a lunga vita >400 Bq/g • No produzione di calore 	Radionuclidi alfa emettitori ≤ 400 Bq/g e beta-gamma emettitori in concentrazioni tali da rispettare gli obiettivi di radioprotezione stabiliti per l'impianto di smaltimento superficiale. Radionuclidi in concentrazioni tali da non rispettare gli obiettivi di radioprotezione stabiliti per l'impianto di smaltimento superficiale.
Alta attività	Produzione di calore o di elevate concentrazioni di radionuclidi a lunga vita, o di entrambe tali caratteristiche.	Impianto di immagazzinamento temporaneo del Deposito Nazionale (D.Lgs n.31/2010) in attesa di smaltimento in formazione geologica

Tab. 1 Classificazione dei rifiuti radioattivi ai sensi del Decreto del Ministero dell'Ambiente 7 agosto 2015

strategiche, politiche ed economiche locali hanno portato i vari Paesi "nucleari" a scelte diametralmente opposte.

Orientati al deposito diretto sono a tutt'oggi: Canada, Finlandia, Sud Corea, Spagna, Svezia e USA, mentre adottano strategie di riprocessamento Belgio, Cina, Francia, Germania (in corso di commutazione a stoccaggio diretto), Gran Bretagna, India, Giappone, Russia e Svizzera.

Il deposito geologico

L'obiettivo fondamentale di un deposito geologico è il confinamento dei rifiuti e il loro isolamento dall'am-

biente per tempi estremamente lunghi, confidando sulla sicurezza passiva della formazione geologica e azzerando il controllo istituzionale del mantenimento delle condizioni di sicurezza.

Tutti i paesi hanno sviluppato concetti di deposito che incorporano i seguenti principi base:

- incapsulamento del combustibile irraggiato o dei rifiuti a vita lunga in contenitori a tenuta con una vita prevista molto lunga;
- assicurazione che le condizioni nel deposito permetteranno ai fusti di rimanere intatti e sigillati per il maggior tempo possibile (queste

condizioni includono ad esempio stabilità meccanica e geochimica);

- riempimento del deposito con materiali appropriati e localizzazione dello stesso in una matrice geologica che possa fortemente limitare il contatto con l'acqua che potrebbe portare il materiale radioattivo nell'ambiente [3].

Questi requisiti comportano studi approfonditi dei siti potenziali che, per essere qualificati, devono essere sottoposti a verifiche di durata anche pluridecennale.

Le barriere devono essere qualificate, quindi dimostrare di essere in grado di mantenere i rifiuti completamente isolati dalla biosfera per tutto il periodo considerato.

È proprio la qualificazione della barriera, oltre alle opere minerarie da adottare, che rende la realizzazione del deposito geologico notevolmente più costosa, più complessa e più lunga rispetto al deposito superficiale.

Per qualificare e, quindi, dimostrare l'efficienza e la durabilità della barriera "deposito geologico" si deve studiare il mezzo geologico "in situ" e costruire laboratori sotterranei (praticamente miniere sperimentali anche di qualche chilometro di estensione orizzontale) al fine di verificare il comportamento della barriera nei confronti dei rifiuti radioattivi, di valutare elementi di ingegneria mineraria connessi con la costruzione, di verificare il livello di impermeabilità e diffusività e le proprietà chimiche e fisiche della roccia in esame.

Tipicamente si considerano tre possibili formazioni geologiche: le formazioni argillose, i depositi salini e le rocce granitiche.

Al momento, per quanto riguarda la realtà europea, si prevede che entro

il 2050 la maggior parte dei Paesi “nucleari” dell’Unione si doteranno di un deposito geologico. Fanno eccezione i Paesi scandinavi in cui il processo d’individuazione e realizzazione del deposito geologico è molto avanzato e si prevede l’entrata in esercizio nel breve periodo.

I contenitori verranno posti in tunnel a una profondità di 400-700 m in una matrice di granito.

Il concetto svedese prevede dapprima un incapsulamento in contenitori cilindrici (altezza 4,8 m, diametro 1 m e massa di 25 t, cfr. Figura 1). La matrice finale è roccia cristallina, la località prescelta è Oskarshamn, l’operatività è attesa per il 2023, la capacità è stabilita in 12.000 tU (tonnellate di uranio) [4].

Per avere un’idea del deposito, si immagini un tunnel carrabile spiraliforme che si immerge per una profondità di 500 m nella roccia cristallina; a profondità stabilite si diramano rami in ciascuno dei quali sono provate a grandezza naturale le varie tecnologie di deposito che spaziano dalla geologia alla chimica alla robotica.

Si deve sottolineare che mentre in passato si pensava al definitivo abbandono in deposito dei rifiuti, oggi si sta facendo strada l’ipotesi del recupero: i rifiuti potrebbero in futuro essere recuperati e costituire una risorsa di grande valore, specialmente quando sarà operativa la nuova generazione di reattori nucleari.

L’unico deposito geologico attualmente in esercizio è l’americano WIPP (Waste Isolation Pilot Plant), gestito dal DOE (Department of Energy) e situato nel deserto salino del Nuovo Messico, il cui processo di qualifica è iniziato nel 1950 e che ospita i rifiuti secondari derivanti dal programma militare nucleare americano (Figura 3).

Dopo studi particolareggiati si conclude che i depositi salini costituivano una promettente matrice per la costituzione di un deposito definitivo.

Questi depositi di roccia salina giacciono in aree geologiche stabili con minima attività sismica e mostrano l’assenza di flussi di acqua che potrebbero diffondere il materiale radioattivo in superficie o dilavare le matrici stesse. Tali matrici sono facili da scavare e dotate di una tale plasticità che sono in grado di rimodellarsi lentamente ricostituendo la continuità degli strati salini, riparando eventuali fratture e quindi separando definitivamente i rifiuti depositati dall’ambiente esterno. I depositi sono costituiti essenzialmente da rocce di cloruro di sodio, originate dall’evaporazione del Mare Permiano 250 milioni di anni fa, e costituiscono uno strato avente spessore di 700 m depositato a un’altezza dalla superficie di circa 300 m. Si prevede una stabilità delle formazioni per altrettanti 250 milioni di anni: dopo questo intervallo di tempo i rifiuti non avranno più bisogno di alcuna attenzione, poiché avranno perso totalmente la loro radioattività originaria.

La situazione italiana

È in corso nel Paese l’iter per la definizione delle aree potenzialmente idonee a ospitare un deposito superficiale temporaneo (che tragarnerà un orizzonte storico di 300 anni) per rifiuti a bassa e media attività, che dovrebbe ospitare ad interim anche i rifiuti ad alta attività, in attesa della soluzione definitiva.

I rifiuti italiani a bassa e media attività ammontano a 75.000 m³, quelli ad alta attività a 15.000 m³. Questi rifiuti sono attualmente dislocati nei

siti dove sono stati prodotti (centrali, centri di ricerca e industrie) con tutto ciò che ne deriva in termini di sicurezza, custodia, sorveglianza, possibili cambi di destinazione d’uso di aree e impianti.

Infrastrutture di deposito temporaneo sono ormai presenti e esercite da tempo in tutti i Paesi dell’UE anche con capacità ben più grandi di quanto necessario per l’Italia. In questo contesto la realizzazione di un deposito geologico nel nostro Paese è poco appetibile. La già citata Direttiva 2011/70/EURATOM del 19 luglio 2011, all’art. 4 comma 4, prevede la possibilità di costituire un deposito geologico di tipo consortile anche al di fuori dell’Unione, che possa accogliere i rifiuti di quegli Stati che abbiano, come l’Italia, piccoli inventari di rifiuti ad alta attività.

È chiaro che un deposito geologico nazionale per piccoli quantitativi abbia costi unitari improponibili per un singolo Paese.

Un deposito superficiale come quello proposto per l’Italia (90.000 metri cubi di rifiuti radioattivi) prevede un investimento di circa 1,3 miliardi di euro e 5/10 anni di costruzione, mentre un deposito geologico (da circa 100.000 metri cubi di rifiuti ad alta attività) può arrivare ad un investimento di molte decine di miliardi di euro ed un tempo di realizzazione di circa trenta anni.

Per questo motivo l’ENEA aderisce, dalla sua creazione nel 2002, all’associazione privata ARIUS (Association for Regional and International Underground Storage), con sede in Svizzera, e partecipa ai lavori di ERDO-WG (European Repository Development Organisation – Working Group). Tale organizzazione si propone di effettuare gli studi di fattibilità nonché la proposizione della società pubblica o privata che

condurrà questo deposito geologico consortile regionale. Si potrà migliorare l'accettabilità sociale evidenziando che una soluzione economica a lungo termine per i rifiuti ad alta attività è disponibile già da oggi.

In ambito comunitario, si sta concludendo il progetto Joprad il cui scopo è stato quello di creare una «programmazione congiunta sullo smaltimento dei rifiuti radioattivi» che permetterebbe di coordinare a livello europeo i programmi di ricerca nazionali e le relative attività associate di ricerca e sviluppo sullo smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi di lunga vita e alta attività.

Tra pochi mesi inizierà il suo follow-up, il progetto EJP 1, e la partecipazione italiana attraverso l'ENEA insieme a Sogin ed altri istituti nazionali costituirà un elemento effettivamente strategico in quanto la Direttiva 2011/70/EURATOM consente di includere nei «programmi nazionali», oltre alla ricerca sui depositi geologici nazionali, anche eventuali accordi tra Stati membri per lo studio e la realizzazione di un deposito geologico condiviso a



Fig. 2 Stazioni sperimentali nell'Hard Rock Laboratory di Äspö, presso Oskarshamn (Svezia)

livello europeo.

Si sottolinea che la costituzione di una società per lo sviluppo di un deposito geologico profondo regionale condiviso è una opzione importante sia dal punto di vista politico che dal punto di vista dell'accettabilità sociale e prevede una strategia ed una de-

cisione a livello istituzionale, anche alla luce di quanto avvenuto in Italia con il referendum per cui il nostro Paese non ha più un programma nucleare da realizzare e quindi il proprio inventario dei rifiuti radioattivi ad alta attività rimarrà nei prossimi anni pressoché stabile.



Fig. 3 WIPP (Waste Isolation Pilot Plant), deposito geologico situato nel deserto salino del Nuovo Messico (USA) e gestito dal DOE (Department of Energy)

BIBLIOGRAFIA

1. IAEA (2009) *Classification of Radioactive Waste General Safety Guide* n.GSG-9 Vienna
2. Direttiva 2011/70/EURATOM del 19 luglio 2011, Art. 6 commi 1, 2, 3
3. IAEA *Storage and Disposal of Spent Fuel and High Level Radioactive Waste*
4. IGD-TP *Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform*

Rossella Muroli

*Presidente
Legambiente*



Antonio Naviglio

*già Professore Ordinario
di Impianti Nucleari,
Sapienza Università di Roma*

.....
Punto & Contropunto è mediata da una tradizione anglosassone. In molte riviste, ma anche in testi divulgativi, si mettono a confronto sullo stesso argomento le opinioni di personalità provenienti da approcci empirici e culturali differenti. Anche la nostra rivista intende proporre questa modalità
.....

Il mancato sviluppo, per vari fattori, della produzione di energia elettrica con il nucleare nel nostro Paese, ha creato situazioni di vantaggio o di svantaggio rispetto a quelle nazioni che vi hanno fatto ricorso?

AN: La fonte energetica ideale per la produzione di energia elettrica deve essere abbondante, sostenibile, economica, affidabile, sicura e garantire posti di lavoro qualificati sia nelle fasi di progettazione che nei luoghi di costruzione e produzione. Nessuna delle fonti disponibili può essere “la” soluzione; l’energia nucleare soddisfa molti dei criteri enunciati, in misura superiore o comparabile ad altre fonti, per cui la fonte nucleare può costituire una componente molto importante in un mix di fonti energetiche realmente sostenibile. I Paesi che hanno scelto di fare affidamento sulla produzione elettrica con il nucleare lo hanno fatto in base ad un rigoroso processo decisionale che coinvolge aspetti tecnico-economici e sociali, ottenendone vantaggi, durevoli nel tempo, dal punto di vista della competitività del sistema produttivo, disponibilità continuativa di energia anche in un’ottica a lungo termine, impulso alla ricerca avanzata e alle collaborazioni internazionali, sviluppo di competenze tecnologiche avanzate, creazione di posti di lavoro qualificati,

grande contributo alla mitigazione dei cambiamenti climatici, riduzione della dipendenza da fonti energetiche provenienti da altri Paesi, spesso soggetti ad instabilità geo-politiche. Offrendo un’elettricità affidabile a prezzi stabili e prevedibili, la fonte nucleare può fornire un’offerta di energia sicura e promuovere lo sviluppo industriale. Da questo punto di vista non vedo certo situazioni di vantaggio per chi, come l’Italia, ha rinunciato all’uso di questa tecnologia.

RM: Non ritengo che l’Italia soffra uno svantaggio in termini di approvvigionamento energetico legato alla mancanza del nucleare. Siamo il Paese del sole e non ci mancano il vento e l’acqua. Siamo un Paese di inventori e innovatori, siamo in grado, e lo abbiamo dimostrato, di produrre l’elettricità che ci serve dalle rinnovabili. Con queste risorse possiamo, e dobbiamo, ridurre le importazioni e la produzione di fonti fossili. Semmai il problema risiede nella scarsa propensione della politica a fare delle scelte nell’interesse del Paese, anziché a favore di poche grandi imprese, a maturare un piano energetico di medio lungo periodo che dia avvio a circuiti economici e imprenditoriali virtuosi, che attraggano investimenti, che produca nuova economia, che cancelli i sussidi alle fonti

fossili e promuova innovazione, risparmio, recupero e riciclo dei materiali.

La comunicazione sugli usi pacifici del nucleare che ruolo ha avuto nell'orientare la pubblica opinione?

AN: Un fattore cruciale per lo sviluppo di un programma di utilizzo dell'energia nucleare nella maggior parte dei Paesi è l'accettazione pubblica. Una comunicazione basata su informazioni a volte infondate, se non palesemente errate, ha avuto ovviamente un impatto negativo sulla percezione del rischio legato all'utilizzo dell'energia nucleare. L'attuale modalità di comunicazione, negli ultimi anni molto incentrata sulla rete, non consente una verifica puntuale delle informazioni e un efficace contraddittorio, tendendo a estremizzare la discussione verso posizioni fortemente negative, senza che la politica e gli esperti riescano a contrapporre reazioni efficaci. Lo strumento della consultazione pubblica e una migliore diffusione delle informazioni, soprattutto a livello locale, consentirebbero una percezione dei rischi e dei benefici degli usi pacifici del nucleare più equilibrata da parte dell'opinione pubblica, favorendo una più consapevole valutazione dei vantaggi oltre che degli svantaggi. Una comunicazione distorta, spesso inserita in un contesto pregiudizialmente schierato, ha certamente nociuto ad un orientamento equilibrato della pubblica opinione.

Al contrario, il settore delle applicazioni mediche di tecnologie nucleari è, nella percezione pubblica, piuttosto slegato dalle problematiche percepite per gli usi pacifici del nucleare, per le quali è stata effettuata molta comunicazione, prevalentemente negativa e spesso del tutto infondata. Se una tecnologia (nucleare o no) permette soluzioni diagnostiche o terapeutiche atte a risolvere dei problemi più gravi, viene accettata con fiducia.

RM: L'opinione pubblica nel nostro Paese è certamente più consapevole di molte altre rispetto ai rischi connessi alla produzione e all'uso del nucleare. Una consapevolezza che nasce dalla storia, dall'incidente nel 1986 alla centrale di Chernobyl, e che si rinnova con i tanti incidenti che si

sono succeduti negli ultimi decenni, fino alla tragedia di Fukushima del 2011.

La comunicazione ha certamente svolto un ruolo importante, ma resta il dato, ribadito con il netto risultato del referendum del 2011, per cui gli italiani considerano il nucleare un modello energetico pericoloso, costoso e obsoleto.

Riproporlo come opzione, quando Paesi come la Germania, la Svizzera, il Giappone e addirittura la Francia, stanno abbandonando questa tecnologia, è quantomeno anacronistico.

In controtendenza oggi ci sono la Cina e gli Stati Uniti di Trump, non credo il migliore degli esempi da seguire.

Sono convinta che anche i Paesi che non hanno ufficializzato la propria uscita dal nucleare, presto dovranno rivedere i propri piani energetici grazie alla rapida crescita delle rinnovabili.

Da più parti vi è l'invito a non trascurare la ricerca nel settore del nucleare e non solo per i problemi contingenti che riguardano il "destino" delle scorie da centrale. Quale è il vostro pensiero in merito?

AN: La ricerca sul nucleare sia a scopi energetici che per altri usi è essenziale per l'umanità intera. Nel caso italiano, non è soltanto (e basterebbe!) necessaria per mantenere una capacità conoscitiva di fenomeni che sono alla base della nostra esistenza e che nel settore squisitamente energetico ci vedono coinvolti, anche solo come soggetti passivi, nel capire, decidere, operare a fronte di possibili eventi incidentali in impianti esistenti all'estero: è necessaria per essere partecipi delle scelte che riguardano l'evoluzione degli impianti, per mettere in atto le soluzioni più idonee per migliorare i livelli di sicurezza e risolvere in maniera economicamente accettabile il problema della "eliminazione" dei rifiuti radioattivi. Stiamo assistendo ad investimenti colossali e ad uno sviluppo tecnologico incredibile in campo nucleare proprio in quei Paesi che, sulla base di semplici considerazioni economiche e politiche, saranno i Paesi leader mondiali a livello industriale nei prossimi anni. Loro useranno l'energia nucleare

in modo massiccio ed esporteranno i loro impianti. Si tratta di decidere se restare a guardare e delegare il ruolo dei nostri giovani ad attività dequalificate al servizio di altri, o avere la ambizione di offrire loro un ruolo di protagonisti e di attori anche a livello internazionale. Ma c'è un punto che vale la pena di sottolineare: la gestione del nucleare e, quindi, di sostanze radioattive, è una cosa molto seria e chi ne ha la responsabilità deve rispondere a requisiti stringenti di professionalità, di competenza, di etica. Ecco che il nucleare in Italia, e quindi anche la ricerca nucleare, sono elementi essenziali della capacità di innovazione e del livello tecnologico nel Paese, ma devono basarsi su una formazione di alto profilo, su una organizzazione ineccepibile delle realtà adibite ad utilizzarla, non devono essere contaminati da situazioni inaccettabili di corruzione, di complicità, di influenza non dettata da sani ed oggettivi motivi di interesse e tutela della collettività, ma figlia di interessi estranei, qualunque essi siano.

RM: Siamo un'associazione che si vanta di praticare l'ambientalismo scientifico, senza forzati ideologismi o preconcetti. Ma siamo anche convinti che la scienza debba saper orientare il proprio lavoro, quindi le priorità, sulla base dei bisogni delle comunità. Ciò significa che per Legambiente oggi gli investimenti vanno concentrati sulle rinnovabili e sull'efficienza, non sul nucleare. Soprattutto, la scienza deve misurarsi con i propri limiti, senza la presunzione che nel XX secolo l'ha portata a convincersi di poter conoscere la natura al punto di dominarla. La ricerca sul nucleare è un esempio perfetto: si è creduto di avere risolto il problema energetico, ma si è presto compreso che l'eredità avvelenata delle scorie radioattive e l'alto tasso di pericolosità, e rischio, legato alle centrali ancora oggi impediscono la chiusura del cerchio.

La normativa vigente impone la costruzione di un deposito unico per i rifiuti radioattivi sul territorio nazionale. E' evidente che una simile impresa pone svariati problemi: ingegneristici, politici, di comunicazione con

le popolazioni "ospitanti". Come le istituzioni preposte stanno affrontando questi problemi?

AN: I quantitativi di rifiuti nucleari ad alta attività presenti attualmente in Italia, così come quelli il cui rientro in Italia è previsto nei prossimi anni, sono estremamente limitati. Anche nei Paesi nei quali si ha una produzione continua e importante di rifiuti nucleari ad alta attività come conseguenza di attività militari o dell'esercizio di impianti connessi all'uso pacifico dell'energia nucleare, in termini di volumi occupati, si tratta di valori estremamente ridotti. Questo ha rappresentato il principale motivo di una situazione "attendista" riscontrabile in modo sostanzialmente generalizzato a livello internazionale per decenni, rispetto a decisioni riguardanti la realizzazione di depositi definitivi per questo tipo di rifiuti. Le attività di ricerca e sperimentazione svolte e in corso nei settori della separazione isotopica e della trasmutazione, con i risultati ottenuti, hanno contribuito al suddetto atteggiamento, essendo percepita come fattibile la distruzione dei rifiuti nucleari ad alta attività ancora da condizionare, tramite irraggiamento con neutroni o altre particelle. Anche se in alcuni Paesi sono state realizzate esperienze di immagazzinamento di tali rifiuti in depositi geologicamente stabili, la maggior parte è sostanzialmente in attesa di destinazione. Mentre proseguono le attività di ricerca, è possibile che a livello internazionale si pervenga, in parallelo, ad accordi per la selezione di uno o più siti geologicamente stabili, nei quali collocare rifiuti provenienti da diversi Paesi. Date le caratteristiche del territorio italiano e quelle di numerosi Paesi con superficie limitata e/o sostanzialmente privi di aree per le quali sia possibile prevedere una stabilità geologica a lungo termine, è possibile che questa seconda soluzione si concretizzi in un futuro non lontano ed è possibile che anche i rifiuti nucleari ad alta attività prodotti in Italia trovino in detta soluzione il proprio destino. Ciò non esclude che sia urgente la piena operatività di un'Autorità per la sicurezza nucleare e l'approvazione e la realizzazione di un deposito nazionale dei rifiuti radioattivi.

RM: La realizzazione di un deposito unico nazionale, che serva allo stoccaggio dei rifiuti a bassa e media radioattività è necessario e urgente. Per le scorie ad alta radioattività occorre invece individuare un deposito unico in Europa. Per trovare il sito nazionale è necessario avviare senza perdere altro tempo un *débat publique*, un percorso di condivisione territoriale, trasparente e partecipato, con i cittadini e le amministrazioni locali, che porti alla scelta del sito. Fino a oggi questo non è avvenuto, ci sono ritardi e poca trasparenza, dopo il lavoro avviato dalla Sogin, il Governo non ci risulta abbia fatto più nulla.

La fusione nucleare è una tecnologia ritenuta utile a dare un contributo all'approvvigionamento energetico del Paese. Viene considerata una fonte rinnovabile. Quale è il vostro "pensiero" in proposito? E ritenete possibile e prossimo un suo utilizzo?

AN: La fusione nucleare è certamente, in linea di principio e in prospettiva, un processo capace di offrire enormi opportunità in termini di copertura dei fabbisogni energetici mondiali, utilizzando come combustibile elementi talmente abbondanti sulla Terra da escludere problemi di approvvigionamento. Tuttavia, nonostante gli sforzi enormi profusi per decenni a livello scientifico e finanziario, non è stata ancora dimostrata la fattibilità di realizzare impianti dedicati alla produzione di energia, in particolare, elettrica, da fusione, competitivi sul piano economico e affidabili per poter dare vita ad una "filiera" di impianti industriali. A livello mondiale numerosi Paesi investono cifre enormi per raggiungere l'obiettivo di realizzare tali impianti: tuttavia, non esiste accordo tra gli stessi scienziati sulla strada più idonea da seguire. Esistono consorzi di Paesi impegnati in questo sforzo tecnologico-finanziario colossale, ma anche nel caso dei progetti più importanti si verifica, nel tempo, una continua revisione al rialzo dei costi e dei tempi di sviluppo. Sicuramente uno dei motivi risiede nel fatto che ci si è concentrati soprattutto sugli aspetti fisici della fattibilità.

Invece, lo sviluppo di reattori a fusione, per la loro complessità e per le molteplici e rilevanti implicazioni a livello ingegneristico, avrebbe dovuto, fin dall'inizio, vedere il coinvolgimento di esperti di tutti i settori implicati, con lo scopo di selezionare o eliminare soluzioni tecniche in funzione delle possibilità di successo. Oggi, soprattutto con la realizzazione del primo esperimento in grande scala di un reattore a fusione, ITER, la consapevolezza della necessità di una gestione multidisciplinare dei progetti è molto maggiore rispetto al passato e le prospettive di successo sono maggiori; per converso, la necessità, per motivi di costo, di gestire progetti attraverso Organizzazioni multilaterali introduce un inevitabile fattore negativo, appesantendo gli aspetti burocratici e di coordinamento. È possibile che la fusione nucleare possa divenire in tempi non biblici una soluzione industriale matura per soddisfare i fabbisogni energetici (il reattore dimostrativo di taglia commerciale DEMO è previsto che possa entrare in funzione nel 2050), ma sicuramente deve essere effettuato un grande sforzo di analisi critica competente su tutti gli aspetti coinvolti, privilegiando le soluzioni semplici rispetto a quelle complesse e deve essere messo in atto un processo di decisa de-burocratizzazione, che è reclamato ed invocato non solo in questo settore.

RM: Ripeto quanto già detto, l'opzione nucleare, semplicemente, oggi non sta in campo, non serve all'Italia. La battaglia contro i cambiamenti climatici si può vincere, meglio e più velocemente, con le rinnovabili. Ed è una battaglia che va combattuta ora, quindi l'energia atomica semplicemente è in irrecuperabile ritardo, così come troppo irrilevante in termini di produzione e di riduzione delle emissioni di gas climalteranti (secondo il Cesi, quattro reattori EPR produrrebbero uno "sconto" di 17 milioni di tonnellate di CO₂ all'anno, ovvero solo il 3% delle emissioni nazionali) e ancora troppo rischiosa. La ricerca deve sostenere l'innovazione capace di rendere il mix rinnovabile la prima fonte elettrica del Paese, affrancarci dalle importazioni, ridurre i costi nelle bollette dei cittadini.

Progetto Compostino: monitoraggio e controllo del processo di compostaggio

Con il Progetto Compostino l'ENEA sperimenta l'opportunità di dotare, anche nelle attrezzature più semplici ed economiche di compostaggio, sistemi di monitoraggio e controllo basati sulla piattaforma Arduino e sulla relativa sensoristica

DOI 10.12910/EAI2017-071

di **Fabio Musmeci**, ENEA

Il Progetto Compostino è finanziato dalle linee di attività del Piano Triennale della Ricerca e Sviluppo di interesse generale per il Sistema Elettrico Nazionale e, più in particolare, dal Piano Annuale di Realizzazione 2016, per quanto attiene all'Area "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici", Tema di Ricerca "Smart cities e smart communities", Progetto D.6 "Sviluppo di un modello integrato di Smart District Urbano".

Questo progetto si basa su due distinte constatazioni.

La prima è che il compostaggio a piccola scala dovrebbe avere nel

futuro una larga diffusione. Oggi vi sono opportunità per installazioni fino a 80 t/anno (con conferimento da parte del sistema di raccolta differenziata e uso qualsiasi del compost) e fino a 130 t/anno per il compostaggio di comunità (conferimento diretto dei cittadini e uso in proprio del compost prodotto). Al contrario non vi è un limite di legge per l'autocompostaggio di una singola utenza. Resta aperto, in questo settore, il problema di attrezzature per il monitoraggio e il controllo di processo adottato, invece, in alcune delle scale industriali più grandi e sofisticate.

La seconda riguarda l'elettronica e

la diffusione di Arduino e delle sue applicazioni.

Arduino è una piattaforma hardware composta da una serie di schede elettroniche dotate di un microcontrollore. È basato su un'idea sviluppata in Italia come strumento per la prototipazione rapida e per scopi hobbistici, didattici e professionali.

Arduino è un progetto *open source*: chiunque può accedere liberamente agli schemi elettrici della scheda e al software di programmazione. Questo ha permesso la nascita di molte altre schede, dette "cloni", con caratteristiche aggiuntive o più minimali. Grazie all'*open source*, la comunità degli utilizzatori di Arduino

e in generale dei *makers*, o artigiani digitali, è cresciuta in modo esponenziale negli ultimi anni. I *makers* costituiscono un movimento culturale contemporaneo che rappresenta un'estensione su base tecnologica del tradizionale mondo del bricolage. Massimo Banzi, fra gli inventori di Arduino, sostiene¹ che "Arduino continuerà ad applicare la sua ricetta vincente per la democratizzazione dell'Internet of Things per le persone, gli insegnanti, i liberi professionisti e le aziende".

Insieme ad Arduino sono stati sviluppati, da numerose aziende elettroniche, sensori a basso costo che permettono l'acquisizione di dati di varia natura. I prezzi di seguito indicati sono quelli relativi a quelli trovati sulle principali piattaforme di *e-commerce*.

Il processo di compostaggio

Si può sinteticamente suddividere il processo di compostaggio in due fasi:

- una prima fase, detta attiva, la cui durata è di poche settimane; durante questa fase i batteri producono calore e la massa aumenta di temperatura e l'umidità diminuisce;
- una seconda fase, detta di maturazione, con una durata superiore anche ai 2-3 mesi. In questa fase la temperatura scende arrivando a quella ambientale e l'umidità diminuisce.

Nella fase attiva, vengono facilmente raggiunte temperature superiori ai 55 °C. Questo permette la igienizzazione naturale della massa.

La respirazione dei microorganismi consuma ossigeno e produce anidride carbonica.

L'aumento di temperatura produce emissione di vapore e una diminuzione di peso, essenzialmente dovuta alla perdita d'acqua, che arriva a circa il 30% del peso dell'immesso.

Tra le varie attrezzature che si possono menzionare per attuare il compostaggio a piccola scala si stanno sperimentando sistemi di monitoraggio e controllo per compostiere elettromeccaniche. Queste macchine, della capacità da poche a centinaia tonnellate/anno, sono composte da (Figura 1):

- una zona di conferimento rifiuti organici + strutturante con un tri-

e spesso ricoperte da un isolatore termico (tipo neoprene);

- da un sistema di areazione forzata tipicamente composto da una ventola che estrae l'aria;
- da un sistema di abbattimento degli odori (biofiltro) che potrebbero generarsi nel caso di una cattiva gestione del macchinario;
- un'area dove terminare la maturazione (seconda fase), per esempio in cumulo.

Il sistema proposto, per il monitoraggio e il controllo del compostaggio, è basato su una rete di sensori che inviano via radio le misure ad



- turatore (opzionale) che sminuzza gli scarti;
- una o più camere (tipicamente di forma cilindrica) ove gli scarti di cucina e lo strutturante subiscono la prima fase di compostaggio. L'avanzamento della massa è assicurato dalla presenza di braccia meccaniche (aspi) o dalla rotazione dell'intera camera. Le camere sono tipicamente in acciaio inossidabile

un nodo centrale che poi le invia ad un server web. Esistono vari modelli di Arduino. L'Arduino nano è stato selezionato per le sue piccole dimensioni e per la porta seriale integrata. La Arduino Nano 3.3 è una scheda basata sul microcontrollore ATmega328. La scheda Arduino è dotata di 14 pin di input/output digitali, 8 input analogici, un quarzo a 16 MHz, un connettore Mini-B USB,

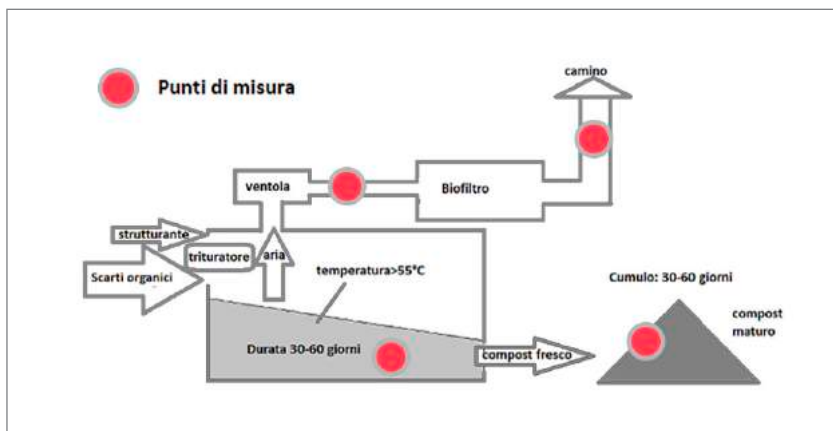


Fig. 1 Schema di un compostatore elettromeccanico e punti di misura suggeriti

un connettore per la programmazione ICSP ed un pulsantino per il reset della scheda.

Per cominciare ad utilizzare la Arduino Nano 3.3 è semplicemente necessario connettere la scheda ad un PC tramite un cavo mini-USB oppure fornire una tensione di alimentazione esterna non regolata compresa fra 6 V e 20 V collegandola al pin 30 oppure fornire una tensione di alimentazione regolata a 5V collegandola al pin 27. La sorgente di alimentazione viene selezionata automaticamente scegliendo quella che fornisce il valore di tensione maggiore.

La scheda Arduino Nano 3.3 è compatibile con molte schede (*shield*) progettate per la Arduino Duemilanove o Diecimila. Il costo di un Arduino nano (clone) è di circa 2 euro cadauno. Per le trasmissioni interne alla rete si è scelto il modulo nRF24L01 a 2,4 GHz preferendolo alle trasmissioni *bluetooth*. Il costo è di circa 2 euro a modulo. Sono necessari però resistenze e condensatori per essere utilizzati con Arduino. È consigliabile quindi l'acquisto di adattatori (costo 1,5 euro). Per la trasmissione dati al server web si stanno sperimentando i moduli GSM/GPRS/SMS tipo SIM800L e i

SIM900 (circa 15/20 euro) dotati di schede M2M (Machine to Machine). La SIM800L ha un'alimentazione da 3,4 V a 4,5 V e richiede quindi uno *stepdown* per ridurla da quella disponibile su Arduino. Fortunatamente la SIM800L versione 2 fornisce la possibilità di essere alimentata a 5 V ed è quindi compatibile con un'alimentazione di Arduino.

Per quanto attiene alla misurazione sono stati identificati quattro punti:

- Nel materiale interno al corpo della macchina ove rilevare temperatura ed umidità. Il collegamento con il corpo macchina cilindrico, qualora esso ruoti, rappresenta un problema (se si esclude la soluzione con contatti striscianti) che è stato affrontato con un'alimentazione wireless o con un rilevamento della sola temperatura con un sensore ad infrarosso. La Figura 2 presenta un prototipo dove un apparato composto dal sensore, da Arduino e da un trasmettitore radio che rileva la temperatura e la trasmette ad un altro Arduino che, nell'esempio, è collegato al display LCD (6 euro). L'alimentazione è presente solo in posizione di riposo e non durante la rotazione (che

avviene raramente, per esempio una volta all'ora) in quanto il dato sarebbe privo d'interesse. Mentre questa soluzione può essere adottata anche per l'umidità, lo stesso non si può dire per l'infrarosso che, oltre ad essere limitato alla sola temperatura, dovrebbe correlare la temperatura esterna a quella interna, magari rimuovendo l'isolamento termico. I sensori di temperatura e umidità hanno costi inferiori ai 5 euro. I sensori che fornivano l'umidità relativa hanno fornito quasi sempre valori limite al 100%.

- All'uscita della ventola e prima del biofiltro. In questo caso può essere anche utile rilevare la CO₂ (che è complementare all'ossigeno e il cui rilevamento possiamo omettere), il metano (per evidenziare processi anaerobici) e l'ammoniaca. Non sono stati trovati sensori economici per l'ammoniaca che può qui raggiungere concentrazioni anche superiori ai 3000 ppm prima del biofiltro. In questa posizione e nella successiva è utile effettuare delle misure di portata d'aria (diverse decine di m³/ora) in funzione del regime della ventola in modo da trasformare le concentrazioni in portate. A titolo d'esempio per una macchina con un m³ di materiale, in tipica lavorazione, si hanno concentrazioni di CO₂ intorno al 2% (in atmosfera si hanno concentrazioni di 0,04%) e portate inferiori ai 200 g/h emesse in atmosfera.
- Dopo il biofiltro prima dell'immissione in atmosfera. Qui è possibile rilevare anche l'ammoniaca con sensori di costo non troppo elevato (esempio TGS2444 a circa 75 euro/cad) con risoluzioni che arrivano ai 300 ppm; questi sensori sono utilizzati negli al-

levamenti. Le misure hanno evidenziato la quasi totale cattura dell'ammoniaca dal biofiltro. Si ritiene che l'ammoniaca sia un buon indicatore *proxy* del cattivo odore percepito.

- Nel cumulo di maturazione. Per il cumulo si sono utilizzate aste in alluminio con punte realizzate in PLA (acido polilattico) con la stampante 3D che ospitano i sensori (Figura 3). Al fine di trovare sperimentalmente l'angolo (alla punta del cono) ottimale per la penetrazione nel cumulo si sono realizzate diverse punte e trovato l'ottimo sperimentalmente su cumuli di diversa consistenza. I risultati mostrano un ottimo intorno ai 60°. Risultato, questo, adottato anche nei penetrometri in uso nella geotecnica.

Data l'eterogeneità intrinseca nella massa processata, che porta i parametri (es. la temperatura) a variare di alcuni gradi anche in materiali limitrofi, non sono richieste particolari accuratèzze nelle misure. In altre parole errori dell'ordine del grado sono ampiamente tollerabili. Per la temperatura, che rappresenta forse il piú importante parametro di processo, sono disponibili varie soluzioni per il *range* desiderato: 0-80 °C per il corpo macchina e 0-60 °C per l'aria e i cumuli. Tra queste vi sono:

- Le termocoppie: in un circuito formato da due conduttori di natura differente, sottoposto a un gradiente di temperatura, s'instaura una differenza di potenziale. Questo fenomeno è sfruttato dalle termocoppie. Esiste una grande varietà di termocoppie, distinguibili in base ai due conduttori elettrici che compongono la giunzione e al campo di applicazione. Nel pro-

getto si stanno sperimentando le termocoppie di tipo K, che sono di uso generale, economiche e disponibili in una grande varietà di formati. La termocoppia acquistata ha un *range* da 0 °C a 800 °C. La sensibilità è di circa 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Il segnale va quindi amplificato. Una termocoppia con il modulo di amplificazione MAX6675 può essere acquistata a circa 4 euro.

- La termoresistenza: un sensore

cializzato in due classi di diversa tolleranza. Il TCR (*Temperature Coefficient of Resistance*) di una termoresistenza indica la variazione media per grado celsius del valore della resistenza fra gli 0 °C e i 100 °C. Il PT100 ha un TCR molto basso e la lettura da parte di Arduino ha bisogno di amplificazione, per esempio con un MAX31865, acquistabile per circa 5 euro. Il PT100 può essere acquistato per circa 1 euro. *Ran-*

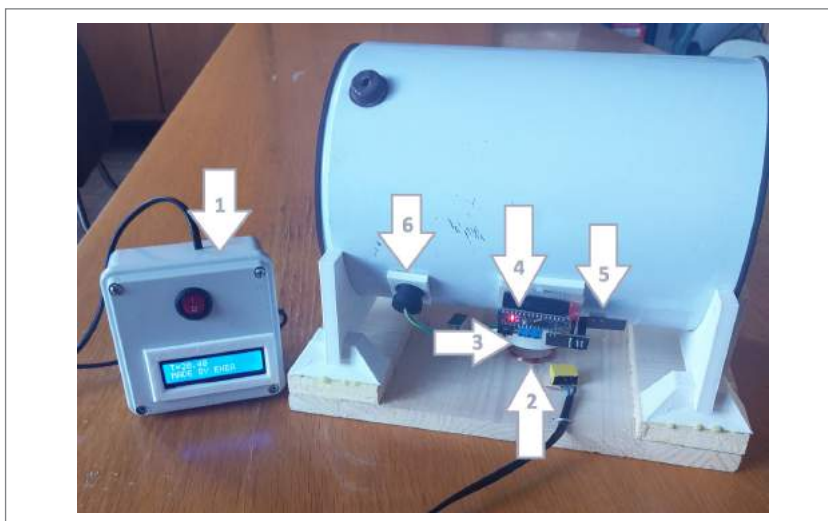


Fig. 2 Modello per il test dell'alimentazione wireless di Arduino e trasmissione dati
 Note: 1. Ricevitore dotato di Arduino nano, radio e LCD; 2. Spira per la generazione del campo magnetico; 3. Spira (all'interno del corpo realizzato in PLA) per la ricezione del campo magnetico; 4. Arduino nano; 5. Modulo radio; 6. Sensore di temperatura

di temperatura che sfrutta la variazione della resistività di alcuni materiali al variare della temperatura. Ne esistono in commercio diversi tipi che possono misurare temperature in un buon intervallo di temperatura (anche se inferiore a quello delle termocoppie). Molto diffuse sono le cosiddette Pt100, ovvero termoresistenze in platino (Pt), in cui la resistenza alla temperatura di 0 °C è pari a 100 Ω . Il PT100 viene commer-

ge di temperatura da -30 °C a 200 °C.

- Termometri ad infrarossi: deducono la temperatura da una parte della radiazione termica (radiazione di un corpo nero) emessa dall'oggetto da misurare. Sono quindi termometri senza contatto. Il MLX90614ESF è stato acquistato a 6 euro. *Range* da -40 °C a 125 °C.
- Termometri basati sulla fisica dello stato solido: si tratta essenzialmente di diodi e/o transistor che



Fig. 3 Test di un sensore (DHT22 per umidità e temperatura, meno di 3 euro) e studio della forma ottimale delle punte

hanno comportamenti dipendenti dalla temperatura. Tra di essi si sono sperimentati i DS18B20, *range* -55 °C-125 °C, (versione impermeabile a 2 euro); l'LM35DZ con *range* da -55°C a 150 °C; il TMP36, *range* -40 °C a 150 °C (2 euro); il DHT22, *range* da -40 °C a 80°, misura anche l'umidità relativa, acquistato a 2,5 euro.

Il *feedback* al processo, a fronte dei dati rilevati, può essere attuato regolando automaticamente la velocità della ventola, il numero di rotazioni degli assi o del cilindro con l'uso di potenziometri digitali e di relè. Su questo le sperimentazioni devono essere effettuate.

In conclusione, il compostaggio a piccola scala può rappresentare,

quindi, un interessante terreno di sfida per i *Makers* e le singole aziende del settore interessate agli sviluppi dell'*Internet of Things* (IoT) e/o allo sviluppo di compostatori *smart* anche a basso costo.

Per saperne di più:
fabio.musmeci@enea.it

¹ Il Sole 24 Ore: 3 agosto 2017

L'esperienza dei Focus Group nell'ambito del Progetto COBRA

La ricerca sociale come approccio olistico per la diffusione delle nuove tecnologie nel settore dei Beni Culturali. Il caso del Progetto COBRA, rivolto agli stakeholder del Lazio, ha prodotto risultati incoraggianti ma soprattutto replicabili anche in altri settori o coinvolgenti un pubblico ancora più vasto

DOI 10.12910/EAI2017-072

di **Ester Palombo**, ENEA

Nell'era in cui le nuove tecnologie sono presenti in pressoché ogni settore della nostra quotidianità, si fa sempre più importante il bisogno di avvalersi di esse per tutelare il passato, in modo che ne possano usufruire nel lungo periodo anche le generazioni future. Ma non solo la conservazione, ad essa si associano anche la fruizione e la valorizzazione che assumono le forme di un'esperienza immersiva e totalizzante, che superi barriere spazio-temporali ritenute fino a poco tempo fa insormontabili. Per questo motivo l'ENEA ha proposto il Progetto COBRA (Sviluppo e diffusione di metodi, tecnologie e strumenti avanzati per la CON-

servazione dei Beni culturali, basati sull'applicazione di Radiazioni e di tecnologie Abilitanti), finanziato interamente dalla Regione Lazio (progetto n. 1031 finanziato dalla Regione Lazio nel periodo 21/07/2015 - 20/12/2017 ai sensi della LR 13/2008 Progetti di ricerca presentati da Università e Centri di Ricerca), il cui scopo principale è quello di trasferire le nuove tecnologie alle imprese e ai protagonisti del Lazio operanti nel settore nei beni culturali, permettendo, inoltre, un avvicinamento dei giovani ricercatori ad un settore in forte crescita attraverso un'esperienza altamente formativa e strettamente pratica. Un progetto tanto ambizioso quanto necessario per una regione che vanta

cifre importanti nell'ambito dei Beni Culturali. Solo per citarne alcune: 259 musei e gallerie, 28 aree/parchi archeologici e 29 monumenti di cui 5 UNESCO¹. La sola Roma ha la più alta concentrazione di beni artistici e culturali al mondo². Un patrimonio immenso e sconfinato che richiede uno sforzo ancora maggiore e una gestione di esso spesso non facile e problematica in un periodo storico sicuramente segnato dalla riduzione di fondi e sostegni economici per molti settori culturali. Le nuove tecnologie a questo scopo risultano fondamentali, ma spesso vi è quasi una barriera invisibile che ostacola il libero trasferimento di esse dalla ricerca agli *stakeholder*. Una barriera formata da molte problematiche



che però possono essere affrontate efficacemente, infatti, il primo passo fondamentale è stato quello di conoscere ed indagare il problema per poi poter mettere in campo delle strategie risolutive.

L'ENEA, attraverso il progetto COBRA, ha cercato di individuare e fronteggiare le problematiche che ostacolano tale delicato meccanismo attraverso il *processo decisionale partecipativo*. Per fare ciò ci si è avvalsi di svariate metodologie provenienti dal mondo della ricerca sociale che sono state anche applicate con successo negli ultimi anni dalla Commissione Europea. Il personale ENEA coinvolto nel progetto è stato affiancato dalla società ECOAZIONI che da anni si occupa di processi decisionali partecipativi.

I risultati ottenuti sono andati anche ben oltre le aspettative iniziali, confermando così la necessità, nonché l'utilità, di affiancare alla ricerca

strettamente tecnologica la ricerca sociale, con il precipuo scopo di indagare e rendere più efficace ed efficiente l'applicazione e la diffusione delle tecnologie alla società e al mondo imprenditoriale: un processo, questo, che purtroppo non è così frequentemente riscontrabile.

Il progetto si è articolato in più fasi strettamente necessarie per la buona riuscita di esso. La prima è stata di indagine e conoscitiva, in cui si è costruito un database delle imprese e degli operatori del Lazio appartenenti al settore dei Beni Culturali. Tale fase è stata fondamentale per quelle successive, ossia tre Focus Group a cui sono stati invitati a partecipare gli stakeholder del settore.

Primo Focus Group del progetto COBRA

Tecnologie per i beni culturali: nuove opportunità di crescita per le

imprese del Lazio. un confronto fra protagonisti.

Il primo Focus Group è stato sostanzialmente dedicato allo studio di bisogni, aspettative e criticità segnalate dal variegato mondo degli stakeholder coinvolti nel settore dei Beni Culturali. Inoltre, si è trattata di un'importante occasione di incontro fra di essi che hanno potuto stabilire nuovi, o rafforzare preesistenti, legami di scambio e collaborazione.

Il Focus Group si è diviso in due fasi. Nella prima i partecipanti sono stati suddivisi per settori di interesse: Gruppo imprese ICT, fruizione, valorizzazione e tecnici; Gruppo imprese di restauro e costruzioni; Gruppo istituzioni e ricerca. Dopo la presentazione degli stessi partecipanti è seguito il momento in cui si è chiesto loro il ruolo ed il peso rivestito dalle tecnologie per la loro attività, nonché i vantaggi e gli ostacoli

rispetto all'utilizzo delle stesse. A ciò è seguita una presentazione plenaria delle principali tecnologie sviluppate dall'ENEA nel settore dei Beni Culturali. In ultimo, i partecipanti sono stati nuovamente suddivisi in gruppi ma questa volta in base alle tecnologie ENEA in precedenza illustrate: Gruppo laboratori ENEA per le indagini conoscitive e il trattamento di materiali e superfici; Gruppo laboratori ENEA per la caratterizzazione strutturale e la protezione dai rischi naturali; Gruppo tecnologie ENEA per la ricostruzione, la fruizione e l'archiviazione dati in digitale. Ai partecipanti è stato chiesto quali fossero le tecnologie a cui fossero principalmente interessati, di illustrare le barriere per l'acquisizione di esse o per l'utilizzo, nonché di proporre eventuali soluzioni al loro superamento.

I risultati emersi sono stati inte-

zione o che vi fosse un collegamento maggiormente diretto fra imprese e ricerca, solo per fare qualche esempio. A ciò sono seguite le soluzioni proposte e i vantaggi che sono notevoli a detta degli stessi partecipanti, come una maggiore competitività delle imprese e una riduzione dei costi e dei tempi degli interventi. Tutto ciò è stato dettagliatamente raccolto ed analizzato nei report facenti parte del progetto (<http://cobra.enea.it/focus-group>).

Secondo Focus Group del progetto COBRA

Tecnologie per i beni culturali: scenari e strategie per l'innovazione e lo sviluppo delle imprese del Lazio.

Il secondo Focus Group è stato dedicato alla costruzione di scenari condivisi dai partecipanti su di



ressanti e fondamentali per poter poi approntare i successivi incontri. Sono emersi, infatti, particolari problematiche, ma anche potenzialità, che non erano completamente in luce sino a quel momento. È ad esempio affiorata la necessità che fossero presenti premialità tecnologiche nei bandi, che vi fosse di una maggiore informazione e comunica-

un orizzonte temporale di 10 anni (2017-2027), avendo quattro temi guida, ovvero scenari di riferimento. Si è trattato di fare uno sforzo di immaginazione da parte dei partecipanti per descrivere le situazioni più probabili in un orizzonte di breve-medio periodo. In questa giornata di lavoro ci si è avvalsi della metodologia EASW* (European

Awareness Scenario Workshop). Alla base di essa vi è il Dilemma di Collingridge ovvero il *paradosso della governance della tecnologia*. Secondo esso, quanto più una innovazione o un cambiamento si sviluppa, tanto più i margini di intervento per apportare modifiche si riducono ed inoltre l'attenzione degli stakeholder coinvolti aumenta solo al passare del tempo creando così un certo gap. Semplificando molto, in un EASW* i partecipanti elaborano visioni (senza porsi particolari limiti, si dice infatti: *think the unthinkable*) e propongono idee che facilitino la realizzazione delle visioni proposte.

I partecipanti sono stati suddivisi in due gruppi: Gruppo Istituzioni e Ricerca; Gruppo Imprese. Ad essi sono stati sottoposti 4 scenari (2 per ciascun gruppo) su di un orizzonte temporale di dieci anni, predisposti a partire dai risultati del 1° Focus Group, che hanno rappresentato la base di partenza su cui è stato effettuato il confronto durante il lavoro in gruppi. Ciascuno scenario si compone, a sua volta, di quattro temi principali: Tema 1 - Politiche di sviluppo e gestione; Tema 2 - Economia e mercato; Tema 3 - Innovazione e trasferimento tecnologico; Tema 4 - Impatto su PA e imprese.

Nello specifico: lo Scenario 1 riguardava le Politiche di accelerazione tecnologica, lo Scenario 2 le Politiche di trasferimento tecnologico, lo Scenario 3 le Imprese driver di innovazione, lo Scenario 4 le Reti di imprese.

Nel corso della giornata di lavoro si è cercato di arrivare alla definizione, relativamente alla regione Lazio, di una **strategia condivisa**, riguardante il trasferimento tecnologico e lo sviluppo nel settore dei Beni Culturali che producesse concreti risultati a

livello economico-sociale. In particolare i due gruppi hanno lavorato per definire due scenari ciascuno e i risultati emersi sono stati riportati su dei poster che sono stati poi discussi in plenaria da tutti i partecipanti. Dall'unione degli scenari si è così ottenuto lo **Scenario Condiviso**, che è stato alla base del terzo ed ultimo Focus Group.

Terzo Focus Group del progetto COBRA

Accordo condiviso per lo sviluppo del settore e il trasferimento tecnologico alle imprese del Lazio.

Nel terzo *Focus Group* ci si è avvalsi della metodologia del *Logical Framework* (Quadro Logico) al fine di rendere realizzabile, attraverso azioni concrete, lo scenario condiviso emerso dal secondo *Focus Group*. È stato chiesto ai partecipanti, suddivisi anche questa volta in due gruppi, di individuare azioni e proposte concrete utili alla realizzazione delle Scenario Condiviso. In un secondo momento, in sessione plenaria, i due gruppi hanno esposto le proprie idee emerse durante i lavori e per finire si è passati alla votazione delle stesse in cui si è delineata una classifica delle azioni ritenute dai partecipanti essenziali per poter arrivare all'attuazione dello Scenario Condiviso.

Lo Scenario Condiviso si struttura su quattro assi strategici così ripartiti: Asse strategico 1 - Sostegno al

processo di aggregazione degli operatori: consorzi e reti temporanee di imprese; Asse strategico 2 - Aumento degli investimenti e della domanda di interventi qualificati ad elevato contenuto tecnologico; Asse strategico 3 - Promozione dell'innovazione e dell'accesso alle tecnologie da parte delle imprese; Asse strategico 4 - Creazione di banche dati comuni e figure tecniche multidisciplinari. Da ogni asse strategico si diramano: degli obiettivi generali; degli obiettivi specifici; delle azioni e per finire degli attori.

In base a quanto emerso dai gruppi di lavoro del terzo *Focus Group* e quindi valutando le azioni che hanno ricevuto un maggior numero di voti dalla platea le 5 aree di intervento ritenute fondamentali e prioritarie per poter attuare lo Scenario Condiviso sono le seguenti: Premialità e requisiti tecnici nei bandi di appalto; Soggetto terzo per supporto scientifico validazione e standardizzazione tecnologica; Formazione e aggiornamento; Comunicazione e informazione; Accordi, convenzioni e incentivi.

Sostanzialmente l'ultimo incontro ha raccolto i frutti dell'intero lavoro facendo emergere non solo delle soluzioni concretamente attuabili per delle future politiche di sviluppo regionale nel settore, ma anche delle questioni che meritano un ulteriore approfondimento come è normale e giusto che sia in ogni studio scientifico che si rispetti.

Un risultato concreto: l'Atto d'Indirizzo

I risultati raccolti grazie all'ultimo incontro hanno permesso di stilare un *Atto di Indirizzo* che è stato messo a disposizione della Regione Lazio e degli operatori del settore in modo che concretamente si possano applicare, attraverso le politiche regionali, le strategie di sviluppo individuate. Una sorta di "promemoria", di "guida pratica" per potersi efficacemente orientare in un orizzonte temporale neanche troppo distante. Un documento che vuole essere non uno sterile resoconto, bensì uno strumento che possa portare avanti, esportandolo eventualmente anche in ulteriori settori economico-sociali, il dialogo collaborativo instaurato fra i vari operatori del settore coinvolti.

Sicuramente è possibile affermare che un progetto di ricerca per definirsi "valido" produce non solo certezze, conferme e soluzioni ma anche nuovi punti interrogativi e domande che meritano di essere analizzati attraverso successive azioni, mettendo così in campo dei risultati non definitivi ma sempre ulteriormente perfezionabili. Gli incontri partecipativi nell'ambito del progetto COBRA hanno l'ambizione di poter essere replicati poiché hanno saputo indagare ambiti e protagonisti, mettendo in luce zone d'ombra che probabilmente erano state ignorate e proponendo soluzioni concrete oltre che, a volte, immediate.

¹ http://www.regione.lazio.it/rl_main/?vw=newsdettaglio&id=3985

² <http://www.visitlazio.com/gli-etruschi1/-/turismo/617616/siti-unesco>



COSA SUCCEDE IN CITTÀ

Orti urbani

di **Bruna Felici**, ENEA

DOI 10.12910/EAI2017-073

Questo articolo si occupa di verde urbano e di pratiche virtuose di recupero di aree agricole e campi abbandonati, che si diffondono con la crescita della sensibilità ambientale e del valore della sostenibilità nella pubblica opinione

Nell'intervista riportata sul numero 1/2017 della rivista dedicato alle *Smart City*, Franco Ferrarotti si sofferma sul tema della trasformazione delle città, sottolineando la relazione tra spazi urbani e vita sociale.

Lo sviluppo storico mostra il passaggio dalla tradizionale *struttura monocentrica* rappresentata dall'agorà, anima pulsante delle città-stato, al modello agglutinante che si espande caoticamente e senza alcun riferimento alla forma originaria della città e che viene fatto risalire al periodo dell'industrializzazione. Tale passaggio ha prodotto una progressiva perdita dell'identità e della memoria storica del territorio.

Oggi, secondo Ferrarotti, assistiamo a un ulteriore processo, non ancora pienamente compreso nella sua estrema

complessità, quello della formazione di *meta-città* o realtà policentriche e trans-culturali che inglobano molteplici tipologie di abitanti, per vita sociale e multiculturalità.

Gli urbanisti utilizzano il termine megalopoli per indicare l'evoluzione delle metropoli verso la nuova forma di relazione tra spazi e persone.

Nelle megalopoli, la tradizionale suddivisione tra ambiente urbano e rurale si modifica, il confine diventa labile per l'inglobamento di ampie fasce agricole all'interno dei paesaggi urbanizzati.

La mutazione sociale che ne deriva rende tali aree un concentrato di vissuti, spesso assai distanti tra loro per scelta e destino. L'immigrazione, la povertà economica, l'esclusione sociale e culturale caratterizzano la condizione di molti degli abitanti delle periferie periurbane. Ma negli



stessi luoghi si trova anche chi ha fatto una scelta di vita, per sperimentare nuove forme di socialità attraverso la dimensione rurale che ancora li caratterizza.

La scelta 'verde' è infatti un fenomeno in crescita negli ultimi anni, soprattutto tra le fasce giovanili in cerca di una diversa opportunità occupazionale¹ e che si ispirano ad una visione comunitaria legata alla terra ed alle pratiche di coltivazione secondo metodi naturali².

Il verde urbano in Italia

Nel 2013 l'Italia si è dotata di una legge sul verde pubblico (L. 10/2013) finalizzata alla programmazione degli interventi per mantenere e potenziare il patrimonio esistente nelle città³.

Nel 2014, secondo l'ultima rilevazione ISTAT sul verde urbano nei capoluoghi italiani, la percentuale di verde corrisponde al 2,7% del totale⁴. In media ciascuno di noi dispone di circa 31 metri quadri con punte che arrivano a 50 metri quadri nel nord-est.

Se si guarda alle diverse tipologie del verde urbano, ri-

salta il dato del sensibile aumento del numero degli orti comunali; in tre anni, dal 2011 al 2014, sono cresciute di un terzo le aree incolte, di proprietà pubblica, assegnate in comodato d'uso a cittadini per uso agricolo.

Gli orti urbani vengono ormai considerati un presidio territoriale dalla grande valenza aggregativa. Contribuiscono a contenere il consumo di suolo, preservano e valorizzano le aree verdi tra le superfici edificate, e promuovono forme di socializzazione e di inclusione sociale.

Per descrivere l'insieme di queste nuove pratiche si utilizza un neologismo, l'*Agricivismo*, che indica la nuova forma di cittadinanza che coniuga dimensione civica e tutela della qualità ambientale e paesaggistica⁵.

A livello internazionale è assai più diffuso il concetto di *community gardening*, che sottolinea la componente comunitaria di pratiche di cura e coltivazione di appezzamenti di terra.

Anche in Italia, negli ultimi anni, si stanno diffondendo modelli di gestione collettiva di spazi verdi, sia pubblici che privati.

Di seguito, la descrizione di alcune esperienze di orti ur-

bani e giardini condivisi diffusi in alcune regioni italiane, partendo da uno dei luoghi europei più noti, per socialità, multiculturalismo e attivismo ambientale, la città di Berlino.

Gli orti urbani di Berlino

Tra le esperienze europee più interessanti di orticoltura urbana comunitaria, le *community garden* di **Berlino** offrono un vasto panorama di progetti rivolti alla promozione della socialità del quartiere o all'inclusione di gruppi in situazione di marginalità sociale.

Nel biennio 2011/2012 si contavano 99 *community garden*, numero che non comprende la tipologia degli orti urbani convenzionali che in genere sono organizzati in manie-



ra più individualistica. Alcune di queste sono nate come esperienze di *guerrilla gardening*, forme di attivismo ambientalista finalizzate alla riqualificazione di un pezzo di terra o giardino incolto.

Tali pratiche, diffuse anche in diverse città italiane, hanno portato a trasformare i lotti coltivati in veri e propri orti di quartiere.

Il *Wuhlegarten* è il primo orto interculturale nato nella periferia berlinese con la partecipazione di una comunità di persone provenienti da aree geografiche assai distanti. Si tratta di un caso di successo, sostenuto dall'amministrazione cittadina e preso a modello per altre esperienze interculturali nella città.

Il *TonSteineGärten* è un orto di quartiere posto all'interno del parco pubblico Bethanien, che è stato avviato nell'estate del 2009. Attualmente l'area, di circa 1500 metri quadri, comprende un orto di circa 60 lotti ed un edificio, che negli anni ottanta fu un centro sociale molto noto.

Il *TonSteineGärten* è un esempio di progettazione partecipata tra gli abitanti del quartiere ed alcuni architetti del

paesaggio, che hanno realizzato la *community garden* e ridisegnato la costruzione esistente. L'edificio, un tempo anche ospedale, ora ospita un museo comunale di arte contemporanea, un bar e uno spazio per *workshop* nel quale si svolgono festival di *street art* e spettacoli di danza e teatro. Altro esempio è il *Prinzessinengarten*, orto urbano mobile creato dalla Organizzazione Non Governativa *Nomadisch Grün* (letteralmente 'giardino mobile'). Erbe aromatiche e ortaggi freschi, biologici e prodotti localmente, vengono fatti crescere in cassoni di coltivazione senza uso di pesticidi. La caratteristica dell'orto è di essere dinamico, in quanto risulta dalla trasformazione temporanea di spazi inutilizzati come cantieri, parcheggi e tetti, che divengono per un determinato periodo di tempo, giardini e orti urbani.

Gli orti urbani di Roma

A **Roma** le aree verdi sono tra le più grandi d'Europa, con 43.000 ettari di verde su 129.000 ettari totali. Nonostante la notevole estensione tali aree non sono sempre fruibili per posizione, cattivo stato di conservazione e per la costante minaccia della speculazione edilizia per rendere le aree edificabili.

Relativamente agli orti urbani, un censimento del Comune di Roma del 2006 ha identificato 2301 orti informali diffusi su 90 ettari di territorio.

Dati più recenti provengono dall'indagine Zappata Romana a cura dell'Urban Architecture Project, che nel 2010 ha messo in piedi la mappa di orti e giardini condivisi a Roma. Si tratta di un sistema di rilevazione nel quale sono gli stessi utenti ad integrare ed aggiornare le informazioni sul web.

Gli orti urbani di Roma hanno una storia recente, che dal 2000 ha visto la diffusione di aree coltivate grazie alla volontà di associazioni, comitati di quartiere, gruppi autorganizzati. Spesso si tratta di pratiche comunitarie dal carattere spontaneistico, come nel caso dei *Guerrilla Gardening* o dei Giardinieri Sovversivi Romani che effettuano 'attacchi di giardinaggio non autorizzato' su piccole aree verdi degradate, rimodellandole ed abbellendole con piante e fiori.

Molte sono le esperienze promosse dall'associazionismo locale come nel caso degli orti urbani del quartiere della Garbatella o il giardino condiviso a San Paolo presso l'ex Casale Garibaldi ora denominato Città dell'Utopia, progetto attorno al quale ruota il lavoro di diverse associazioni romane. Il Casale è definito come 'laboratorio sociale e culturale che affronta i principali temi legati ad un nuo-

vo modello di sviluppo locale e globale'. Il giardino al suo interno è frutto della collaborazione tra il Servizio Civile Internazionale, affidatario del Casale, e l'Associazione Romana di Erboristi di Monte dei Cocci.

EutOrto è un'altra realtà del quartiere Laurentino, nata dall'iniziativa di un gruppo di lavoratori di una società informatica messi in cassa integrazione. Iniziata come forma di protesta e denuncia nei confronti di un licenziamento mascherato, il gruppo dei Lavoratori Scomparsi Agile ex Eutelia, dalla pagina Facebook, hanno aderito alla rete *Horto Urbis* con altre realtà per attivare un orto antico romano nel parco dell'Appia Antica, presso l'ex Cartiera Latina.

Il progetto degli orti urbani di Casal Brunori, a sud di Roma, ha ricevuto un finanziamento europeo⁶ grazie alle finalità sociali ed ambientali dei suoi promotori. La cura del patrimonio ambientale pubblico è garantita dal rispetto di elementari regole di sostenibilità ambientale sull'uso delle risorse idriche e sul riciclo dei rifiuti organici provenienti dalle vicine abitazioni. L'area degli orti comprende 107 parcelle, coinvolge direttamente circa

700 persone, tre scuole e quattro associazioni e indirettamente oltre 3000 residenti.

Il regolamento del Comune di Roma per la gestione e l'utilizzo degli orti urbani è del luglio 2015. La Delibera 38/2015 stabilisce che le assegnazioni dei lotti ai singoli cittadini passino prima attraverso le associazioni affidatarie sulla base della presentazione di un progetto al Municipio e, successivamente, ai singoli cittadini.

La delibera comunale arriva alla fine di un lungo confronto, tra diverse realtà impegnate sulla tematica degli spazi verdi urbani e l'istituzione pubblica, che ha portato a valorizzare la dimensione comunitaria nelle pratiche di utilizzo di orti e giardini condivisi.

Le esperienze in Toscana ...

In **Toscana** l'istituzione pubblica ha un ruolo particolarmente attivo nella diffusione delle pratiche orticole. La Regione infatti, ha lanciato l'iniziativa Centomila orti in Toscana, che prevede uno specifico finanziamento, 3 mi-



lioni di euro, per sostenere la nascita di orti pubblici nei Comuni toscani. Con tale iniziativa si vuole fornire uno strumento di supporto ai Comuni interessati a realizzare uno o più complessi di Orti urbani 'finalizzati non solo alla produzione orticola o floreale, quanto a definire aree di aggregazione sociale e di scambio culturale, oltre al recupero di aree degradate inserite nel contesto urbano'. L'iniziativa riconosce soprattutto il valore della dimensione aggregativa e di scambio e privilegia i più giovani, agevolando le richieste degli under 40.

Ai sei Comuni pilota di Firenze, Bagno a Ripoli, Grosseto, Livorno, Siena e Lucca, si sono aggiunti nel 2017 altri 56 Comuni toscani che riceveranno dalla Regione un contributo pari al 70% delle spese previste per la realizzazione dei propri progetti.

... e quelle di Milano e dintorni

Anche a **Milano** il fenomeno dell'agricoltura urbana è significativamente cresciuto negli ultimi anni. Dal 2012 esiste un 'Regolamento per l'affidamento dei giardini condivisi' che, come a Roma, rende le aree verdi luoghi pubblici da utilizzare con soluzioni collettive.

Da una ricerca condotta tra il 2014 e 2015⁷ risultano 68 iniziative di utilizzo del verde urbano che interessano una superficie di 300mila mq e coinvolgono circa 2000 cittadini. Molte di queste sono orti o giardini comunali gestiti in convenzione.

Anche la città di Milano è animata da movimenti e gruppi spontaneistici che si ispirano alle esperienze internazionali per il recupero di spazi verdi incolti. Critical Garden, Landgrab, Guerrilla Gardening, Playground, Cascina Autogestita Torchiera, sono alcuni dei nomi di gruppi che praticano azioni dimostrative sul verde urbano, con incursioni e trasformazioni di spazi verdi lasciati in uno stato di abbandono.

La Rete Libere Rape metropolitane, altra esperienza di chiara matrice spontaneistica, come indica il nome, si autodefinisce spazio di incontro plurale, aperto, flessibile, che promuove e riconosce esperienze e attività degli orti e dei giardini comunitari. Questi vengono indicati come laboratori di condivisione e di sperimentazioni di nuove relazioni sociali che guardano al verde come risorsa comune.

Tra le iniziative di coordinamento e monitoraggio del territorio si segnala la Mappa degli orti milanesi, disponibile

online e aggiornabile direttamente dagli utenti.

Vicino Milano, il **Comune di Rozzano**, ha promosso il progetto Orti urbani eco-compatibili. Ha l'obiettivo di realizzare un prototipo di orto eco-compatibile, una sorta di palestra condivisa di sperimentazione di bio-orticoltura mediante il coinvolgimento di circa 600 orticoltori. Il progetto si muove sui diversi fronti dell'inclusione sociale con la partecipazione della Consulta delle Donne e dei Servizi Sociali. È nata così l'esperienza dell'orto-giardino per donne fragili, gli orti multietnici per le tante famiglie di immigrati presenti sul territorio, e gli orti didattici e intergenerazionali per i bambini delle scuole dell'infanzia e primarie guidati dalle esperte mani degli ortisti più anziani.

Conclusioni

L'articolo ha voluto raccontare come la città risponde alle sue tante trasformazioni anche attraverso nuove modalità di utilizzo delle aree verdi.

Si tratta di una panoramica che vuole essere solo esemplificativa delle tantissime iniziative esistenti sul nostro territorio.

È il racconto di una consapevolezza ambientale in crescita, che coniuga pratiche dal basso, percorsi in rete solidali realizzati attraverso forme fantasiose di socializzazione. Le città hanno visto consolidarsi iniziative ed esperienze che riflettono una diversa idea di sviluppo, maturate durante la lunga crisi nei tanti laboratori di aggregazione e di inclusione sociale che sono nati in questi anni.

Se gli orti di guerra hanno rappresentato una preziosa risorsa alimentare durante il scorso secolo, gli orti urbani possono esserlo per il futuro delle città rendendole luoghi più vivibili ed inclusivi.

RISORSE ONLINE

Community garden di Berlino:

<http://u-rbangardening.seedbomb.city/> Mappa degli orti urbani e giardini condivisi in Italia:

<http://www.gramignamap.it/> <http://www.zappataromana.net/mappa/>

<https://ortodiffuso.noblogs.org/la-mappa/>

Indagine sugli orti e giardini a Milano:

<https://ortodiffuso.noblogs.org/files/2016/09/Gli-orti-urbani-nella-citta%CC%80-contemporanea-Presentazione-PDF.pdf>

¹ Censis, *Un futuro per l'Italia: perché ripartire dall'agricoltura*, 2014 e *La congiuntura della filiera agroalimentare I e II trimestre 2017*, ISMEA luglio 2017

² Solo nell'ultimo anno c'è stato un aumento del 10% del consumo dei prodotti biologici, *Tutti i numeri del Bio italiano*, ISMEA, settembre 2017

³ *Linee guida per il governo sostenibile del verde urbano*. Comitato per lo sviluppo del verde pubblico. MATTM, 2017

⁴ Istat, *Verde Urbano*, Anno 2014, Focus statistiche del 24/5/2016 e Statistiche Focus del 24/5/2016 <http://www.istat.it/it/archivio/186267>

⁵ *AGRICivismo agricoltura urbana per la riqualificazione del paesaggio*. A cura di Richard Ingersoll et al. 2007. Regione Emilia-Romagna

⁶ Si tratta del progetto Europeo SIDIG.MED "Dialogo sociale e interculturale attraverso la gestione dello sviluppo locale: agricoltura mediterranea urbana e peri-urbana (UPA)"

⁷ *Gli orti urbani nella città contemporanea: Uno studio di caso su prati che e strumenti di policy*. Tesi di Laurea Magistrale di Elena Colli, Università degli Studi di Milano Bicocca, AA 2014/2015

La prossima rivista in uscita a marzo su:

eai.enea.it



Visita il sito!

