Volume XII n. 3 Dicembre 2009

Radiazioni
Ricerca e Applicazioni

Periodico della Società Italiana per le Ricerche sulle Radiazioni

Poste Italiane S.p.A. - Sped. in Abb. Postale - D.L. 353/2003 (Conv. in L. 27/02/2004 n. 46) art. 1 com. 2 - DCB - Roma

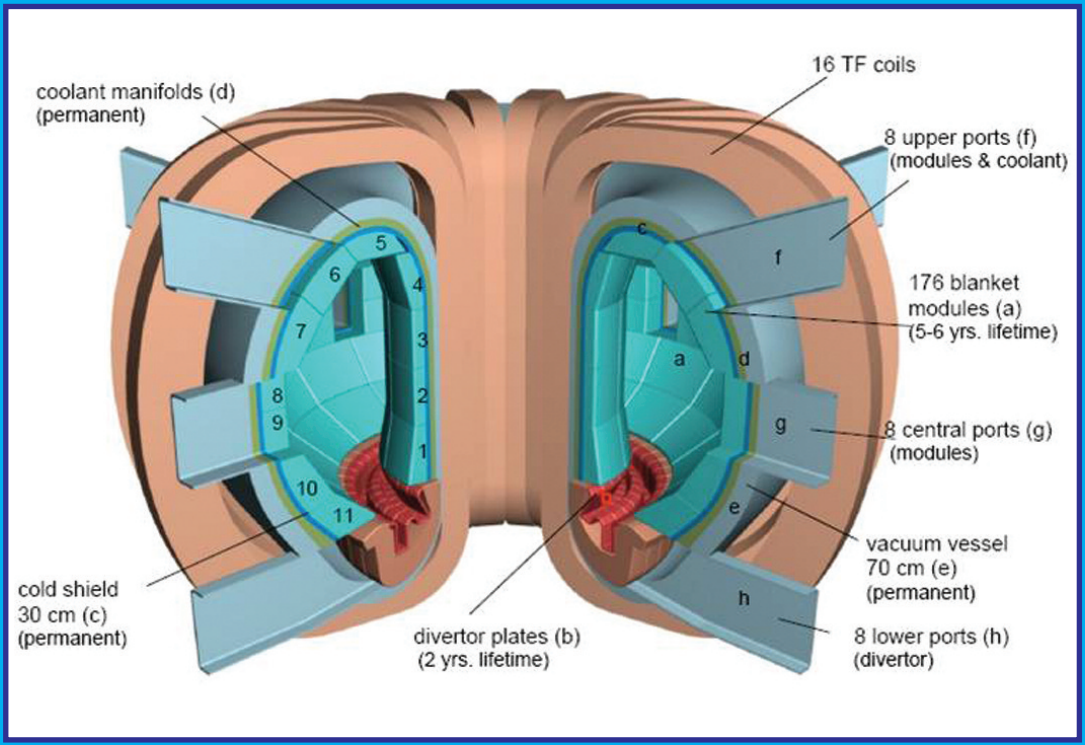
Relazioni del Workshop
"ENERGIA E RADIAZIONI:
QUALI PROSPETTIVE DALLA RICERCA?"
Napoli, 9 novembre 2009

RIFLESSIONI SUL PROBLEMA ENERGETICO

ENERGIA PER L'ASTRONAVE TERRA

IMPIEGO DEI REATTORI NUCLEARI DI RICERCA NELL'AMBITO DELLA RICERCA NUCLEARE PER APPLICAZIONI ENERGETICHE

LA CONTAMINAZIONE DA ATTINIDI NELL'AMBIENTE: INDIVIDUAZIONE DELLA SORGENTE ATTRAVERSO LA SPETTOMETRIA DI MASSA CON ACCELERATORE



Società Italiana
per le Ricerche
sulle Radiazioni
S.I.R.R.

XV CONVEGNO NAZIONALE

DELLA SOCIETÀ ITALIANA PER LE RICERCHE SULLE RADIAZIONI (S.I.R.R.)

Roma, 27-29 ottobre 2010
Aula Pocchiari, Istituto Superiore di Sanità, Roma
www.iss.infn.it/sirr2010

Comitato Scientifico
M. A. Tabocchini (ISS e INFN Roma1, Roma)
M. Amichetti (Ag. Prov. Protonterapia, Trento)
L. Manti (Università Federico II e INFN, Napoli)
F. Pacchierotti (ENEA, Roma)
M. Pugliese (Università Federico II e INFN, Napoli)
A. Rosi (ISS e INFN Roma1, Roma)
A. Testa (ENEA, Roma)
A. Torreggiani (CNR, Bologna)

Comitato Organizzatore
M. A. Tabocchini (ISS e INFN Roma1, Roma)
A. Campa (ISS e INFN Roma1, Roma)
R. De Vita (ENEA, Roma)
S. Grande (ISS e INFN Roma1, Roma)
F. Pacchierotti (ENEA, Roma)
C. Patrono (ENEA, Roma)
A. Rosi (ISS e INFN Roma1, Roma)
O. Sapora (ISS e INFN Roma1, Roma)
A. Testa (ENEA, Roma)
C. Vidali (A.O.U., Trieste)

Relazioni a invito:
M. Bignami (Roma), C. Chatgilialoglu (Bologna), P. Fattibene (Roma), C. Fiorino (Milano), L. Mariotti (Pavia), M. Pugliese (Napoli), G. Simone (Roma), S. Sterpone (Roma), V. Valentini (Roma), E. Vismara (Milano)

Temi del Convegno

Studi di base in biologia, fisica, chimica e medicina
Fisica e Chimica delle radiazioni; Chimica Nucleare e Radiochimica; Aspetti dosimetrici e nuovi sviluppi nei vari settori della dosimetria; Effetti "targeted" e "non targeted" delle radiazioni ionizzanti; Stress ossidativo; Meccanismi di riparazione del danno; Radiazioni non ionizzanti: aspetti fisici ed effetti biologici; Target molecolari per diagnosi e terapia.

Applicazioni in medicina
Imaging funzionale e medicina nucleare; Micro-ambiente e radiosensibilità tumorale; Qualità in radioterapia e radiodiagnostica; Interazione radiazioni-farmaci; Piani di trattamento ed implicazioni radiobiologiche, risposta individuale in radio-chemioterapia; Radioterapia innovativa con fotoni e con adroni.

Applicazioni industriali ed alimentari
Acceleratori di particelle, macchine radiogene: nuovi sviluppi e nuove realizzazioni; Trattamento di alimenti, controlli di qualità; Radiation processing, radiation curing.

Applicazioni in campo ambientale, energetico e per i beni culturali
Beni artistici: tecniche diagnostiche e trattamenti conservativi; Trattamenti disinquinanti; Impianti nucleari e decommissioning; Radioprotezione.

Segreteria Organizzativa
*Agenzia **italymeeting***
Via Parsano, 6/b - 80067 Sorrento (NA) - Italy
Tel. +39 081 8073525 +39 081 8784606
Fax +39 081 8071930
E-mail info@italymeeting.it

Segreteria Scientifica
A. Campa, S. Grande
E-mail: sirr2010@iss.infn.it
www.iss.infn.it/sirr2010

Segreteria Tecnica
S. Colilli (ISS e INFN Roma1, Roma)
F. Grisanti (ISS, Roma)
M. Sabatini (ISS e INFN Roma1, Roma)

SOMMARIO

Radiazioni Ricerca e Applicazioni
Periodico della Società Italiana per le Ricerche sulle Radiazioni
Pubblicazione Periodica Quadrimestrale
Dicembre 2009 - Vol. XII n. 3

Direttore Responsabile
Francesca Ballarini
Dipartimento di Fisica Nucleare e Teorica
Università di Pavia
e-mail: francesca.ballarini@pv.infn.it

Direttore Editoriale
Raffaele De Vita
Sezione Tossicologia e Scienze Biomediche
ENEA Centro Ricerche Casaccia, Roma
e-mail: devita@enea.it

Capo Redattore
Lorenzo Manti
Dipartimento di Fisica
Università Federico II, Napoli
e-mail: lorenzo.manti@na.infn.it

Comitato di Redazione
Francesca Antonelli
Dipartimento Tecnologia e Salute
Istituto Superiore di Sanità, Roma
e-mail:francesca.antonelli@iss.it

Mauro Bonardi
Università degli Studi di Milano
e-mail: mauro.bonardi@mi.infn.it

Marco Schwarz
Agenzia Provinciale per la Protonterapia
Trento
e-mail: schwarz@atrep.it

Cristiana Vidali
S.C. di Radioterapia
Agenzia Ospedaliero-Universitaria di
Trieste
e-mail: cristiana.vidali@aots.sanita.fvg.it

Per Informazioni e Corrispondenza
Francesca Ballarini
Tel. 0382 987949
e-mail: francesca.ballarini@pv.infn.it

Editrice: Società Italiana
per le Ricerche sulle Radiazioni

Registrazione del Tribunale di Roma
n. 406 del 6 Agosto 1998

Grafica: Renato Cafieri

Stampa:
Pubblicità:

S.E.G. TIPOLITOGRAFIA
Zona Industriale Settevene - NEPI (VT)
Tel. 0761527323 - Fax 0761527323

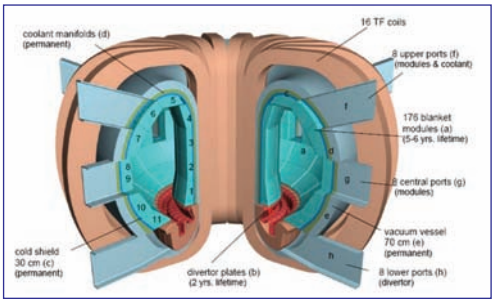
Relazioni del Workshop "ENERGIA E RADIAZIONI: QUALI PROSPETTIVE DALLA RICERCA?" Napoli, 9 novembre 2009

RIFLESSIONI SUL PROBLEMA ENERGETICO 4
Luigi Campanella

ENERGIA PER L'ASTRONAVE TERRA 5
Vincenzo Balzani

IMPIEGO DEI REATTORI NUCLEARI DI RICERCA NELL'AMBITO DELLA RICERCA NUCLEARE PER APPLICAZIONI ENERGETICHE 8
Andrea Borio di Tigliole

LA CONTAMINAZIONE DA ATTINIDI NELL'AMBIENTE: INDIVIDUAZIONE DELLA SORGENTE ATTRAVERSO LA SPETTROMETRIA DI MASSA CON ACCELERATORE 11
Filippo Terrasi



In copertina: Reattore a Fusione Nucleare (Tokamak) da "Impiego dei reattori nucleari di ricerca nell'ambito della ricerca nucleare per applicazioni energetiche" di Andrea Borio di Tigliole, direttore del Laboratorio Energia Nucleare Applicata (LENA), Dipartimento di Fisica Nucleare e Teorica, Università degli Studi di Pavia.

Redazione Editoriale
Società Italiana per le Ricerche sulle Radiazioni
Sezione Tossicologia e Scienze Biomediche
ENEA Centro Ricerche Casaccia, s.p. 016
Via Anguillarese, 301 - 00123 ROMA
☎ 06/30484671 Fax 06/30484891
e-mail: devita@enea.it
http://www.sirr.unina.it

Segreteria S.I.R.R.
Sezione Tossicologia e Scienze Biomediche
ENEA Centro Ricerche Casaccia, s.p. 016
Via Anguillarese, 301 - 00123 Roma
☎ 06/30484442 Fax 06/30486559
e-mail: pacchier@enea.it

RIFLESSIONI SUL PROBLEMA ENERGETICO

Luigi Campanella
Presidente della Società Chimica Italiana
e-mail: luigi.campanella@uniroma1.it

E' ormai chiaro a tutti che dovremo presto modificare il nostro sistema di vita ed, in particolare, quello della produzione energetica. Tale conclusione è il risultato di un'analisi che presenta punti prioritari: non è chiaro né definito quando il petrolio finirà, ma certamente prima o poi si esaurirà. Lo stesso destino è riservato al gas naturale, anche se in tempi probabilmente più lunghi. L'altro punto è che il consumo di tali forme di combustibile ha prodotto il riscaldamento globale dovuto all'eccesso di produzione di gas serra. La combustione di combustibili fossili, sia essa finalizzata a generare elettricità o ad alimentare le nostre autovetture o a riscaldare le nostre case, fornisce il principale contributo alle emissioni di CO_2 nell'atmosfera. La realizzazione di una società meno dipendente dal carbonio è quindi una necessità improrogabile. Questo può essere ottenuto con differenti approcci fra loro complementari ed integrati, con il fine comune di ridurre il riscaldamento globale a non più di 2 °C. Le opzioni vanno dall'aumento di efficienza alla cattura di CO_2 e conseguente sequestrazione, dall'aumento percentuale di energia rinnovabile a forme di energia meno produttrici di CO_2. Se si analizzano le domande fin qui poste ci si rende conto dell'importanza che la chimica ricopre nella maggior parte delle soluzioni tecnologiche. Quasi ogni conversione di energia da una forma ad un'altra comporta un processo chimico e la comprensione di queste reazioni è la chiave per sviluppare nuovi materiali e nuovi processi produttivi. Ovviamente questo ruolo centrale non vuol dire l'esclusione delle altre discipline, che devono invece correlarsi fra loro e con la chimica, per contribuire a questo fantastico processo innovativo.

La crisi energetica che viviamo non è una crisi di offerta: si pensi che in un'ora il sole fornisce l'energia necessaria a tutto il pianeta per un anno. Il problema sta nei metodi di sfruttamento dell'energia, a partire proprio dalla fonte principale di cui disponiamo, il sole. Da qui le vie più promettenti:

1) l'uso diretto dell'energia solare attraverso la fotosintesi artificiale, lo splitting catalitico dell'acqua e la fissazione della CO_2;
2) la conversione dell'energia solare in biomasse, a sua volta utilizzate come sorgente di energia;
3) l'uso diretto mediante effetto fotovoltaico e tecnologie correlate;

L'altra fonte promettente è il vento eventualmente combinato con il sole; è chiaro che, a seconda delle condizioni ambientali, l'una o l'altra soluzione si fanno preferire.

La ricerca dovrà quindi risolvere alcuni prioritari problemi quali quelli correlati alla natura dei catalizzatori nel caso dello splitting dell'acqua, all'incremento preferenziale dell'uso di biomasse ligno-cellulosiche rispetto alle altre risolvendo di conseguenza il problema della loro riluttanza all'idrolisi, a nuove funzionalizzazioni di biomolecole ai fini del loro uso come materie prime per biocombustibili, alla produttività vegetale, alla produzione di dispositivi fotovoltaici a costi più accessibili degli attuali, allo sviluppo di materiali necessari allo stoccaggio dell'energia.

Non trascurabile, infine, è l'aspetto delle formazioni: se riusciamo ad affascinare i giovani con i temi della chimica orientata a risolvere i problemi dell'energia essi saranno gli scienziati dell'energia del futuro.

ENERGIA PER L'ASTRONAVE TERRA

Vincenzo Balzani
Dipartimento di Chimica "Giacomo Ciamician", Università di Bologna
e-mail: vincenzo.balzani@unibo.it

Energia ovunque

L'energia è la risorsa più importante per soddisfare i bisogni primari dell'umanità e per permettere a ciascuno di raggiungere e mantenere un buon livello di benessere materiale. Conosciamo bene l'importanza dell'energia perché ne facciamo abbondante uso tutti i giorni: per viaggiare, cuocere o conservare i cibi, illuminare e far funzionare il numero sempre crescente di apparecchiature che riempiono le nostre case di cittadini di un paese sviluppato. Forse, però, neppure noi ci rendiamo conto pienamente dell'importanza dell'energia [1-4]. L'energia è più importante del cibo perché, oggi giorno, il cibo si può produrre in grandi quantità ma a prezzo di un'alta spesa energetica: ad esempio, per mettere sul mercato 1 kg di carne è necessaria una spesa energetica equivalente a 7 litri di petrolio. L'energia è più importante dell'acqua potabile, perché quando questa scarseggia se ne può produrre a volontà dissalando l'acqua di mare, ma al prezzo energetico di 3 litri di petrolio per ogni metro cubo d'acqua. L'energia è la linfa vitale dell'industria, perché per fare qualsiasi "cosa" ci vuole energia e quindi in ogni oggetto c'è, nascosta, una grande quantità di energia. Ad esempio: per produrre una tonnellata (t) di fogli di carta è necessaria una quantità di energia pari a 0,8 tep (tonnellate equivalenti di petrolio); per le materie plastiche 1,5-3,0 tep/t; per l'alluminio, circa 5 tep/t; per il titanio, molto usato nell'industria aerospaziale, circa 20 tep/t. Per fabbricare un'automobile si utilizzano mediamente 3 tep/t, per cui si può stimare che, prima ancora di iniziare a circolare, un'auto ha già consumato circa il 25% dell'energia totale che consumerà prima di essere rottamata: prima cioè che il residuo di energia in essa contenuta sia distrutto usando altra energia.

Nell'attuale fase storica l'energia è fornita in gran parte dai combustibili fossili: petrolio, gas naturale e carbone. Un tesoro custodito per milioni di anni nella stiva dell'astronave Terra, che abbiamo iniziato a "bruciare" intensivamente solo negli ultimi 100 anni e che negli ultimi decenni è diventato anche la materia prima dell'industria chimica.

I combustibili fossili costituiscono una risorsa energetica molto potente e molto facile da usare, ma non rinnovabile. Li abbiamo usati e in parte li stiamo ancora usando senza parsimonia, ma ci stiamo rendendo conto che essi sono un regalo irripetibile e quantitativamente limitato che la natura ci ha fatto. Al mondo si consumano ogni giorno 84 milioni di barili di petrolio, 6,8 miliardi di metri cubi di gas e 14 milioni di tonnellate di carbone: quanto potrà durare? Sappiamo anche che l'uso massiccio e prolungato dei combustibili fossili reca gravi danni all'uomo e all'ambiente: fino a quando potremo permetterci di causare tali danni?

La crisi energetica

La crisi energetica mette in discussione il modello di sviluppo basato sul consumo a tutti i costi, che la grande disponibilità di energia a prezzi irrisori ha creato nei decenni passati e di cui ha goduto solo una minoranza della popolazione della Terra. E' chiaro che non sarà possibile far vivere "all'americana" (800 automobili ogni mille abitanti) tutti gli abitanti della Terra utilizzando i combustibili fossili, perché non ce n'è a sufficienza. E in un certo senso dovremmo aggiungere "per fortuna" perché, se ce ne fosse piena disponibilità, un loro uso massiccio causerebbe alterazioni climatiche e problemi sanitari di portata devastante.

Per assicurare all'umanità un futuro energetico sostenibile è quindi necessario svincolarsi progressivamente dall'uso dei combustibili fossili ed ottenere energia da altre fonti. Le soluzioni possibili sono sostanzialmente due: da una parte l'energia solare e le altre energie rinnovabili, dall'altra l'energia nucleare. Partendo da questi incontrovertibili dati di fatto, è necessario compiere scelte sagge e prendere rapide decisioni nel campo della politica energetica.

Energia nucleare

L'energia nucleare costituisce il 15 % dell'energia elettrica mondiale e il 6% dell'energia primaria complessiva. Certamente i due maggiori incidenti (Chernobyl, Three Mile Island) hanno minato l'accettabilità sociale della tecnologia nucleare, ma la crisi del settore ha ragioni principalmente economiche. Il nucleare trova

molte difficoltà a svilupparsi in regime di libero mercato. Infatti, si costruiscono nuove centrali principalmente nei Paesi ad economia pianificata come Cina, Russia ed India, dove lo Stato si accolla gran parte dei costi. Nessuna impresa privata è disposta ad investire in progetti che possono andare incontro a rischi di varia natura. Non sono pochi gli esempi di centrali che sono state costrette ad interrompere la produzione o addirittura a chiudere per problemi tecnici. Il prezzo dell'uranio è salito di oltre 7 volte dal 2002 al 2007, molto più del petrolio. Ma sono soprattutto due problemi a rendere molto difficile, se non impossibile, la costruzione di centrali nucleari nei paesi a libero mercato. Il primo è in che modo e con quali costi si provvederà alla messa in sicurezza delle scorie ad alta radioattività, pericolose per centinaia di migliaia di anni. Questo problema non è stato risolto neppure negli Stati Uniti, il paese più avanzato dal punto di vista tecnologico. Il secondo problema riguarda chi si deve assumere l'onere dello smantellamento delle centrali al termine del loro funzionamento. In Gran Bretagna si è stabilito di rimandare lo smantellamento a 100 anni dopo la chiusura.

Bisogna anche notare che tra i primi 15 detentori di risorse di uranio non vi è un solo paese dell'Unione Europea: il nucleare, quindi, non può essere una strada verso l'autosufficienza energetica europea e tanto meno italiana

Il tentativo del rilancio del nucleare in Europa da parte della ditta francese AREVA con la costruzione in Finlandia di un reattore del tipo di quelli che si vorrebbero installare in Italia sta naufragando: il contratto prevedeva la consegna del reattore "chiavi in mano" nel settembre 2009 al costo di 3 miliardi di €: ad oggi, i lavori sono in ritardo di 3,5 anni ed il costo è aumentato di 1,7 miliardi di €; ma non è finita, perché nel novembre scorso le autorità per la sicurezza nucleare di Finlandia, Francia ed Inghilterra hanno chiesto drastiche modifiche nei sistemi di controllo del reattore, cosa che da una parte causerà ulteriori ritardi e dall'altra conferma che il problema della sicurezza non è facile da risolvere.

Che l'energia nucleare non sia il toccasana per risolvere i problemi energetici, lo dimostra una notizia data da Le Monde il 17 novembre scorso: pur avendo 58 reattori nucleari, la Francia attualmente importa energia elettrica.

Non vanno poi dimenticati gli intricati dilemmi di una tecnologia che ha risvolti etici molto profondi legati alla sua intrinseca complessità e alla cosiddetta proliferazione nucleare connessa al legame ambiguo, ma oggettivamente indissolubile, con le tecnologie militari (il caso Iran è emblematico). Infine, gli aspetti economici, tecnici e militari rendono particolarmente inadatta l'energia nucleare per i Paesi poveri di risorse finanziarie, scientifiche e culturali: proprio quei Paesi che hanno il diritto di aumentare la loro disponibilità energetica nei prossimi, cruciali, 2-3 decenni.

Energia solare e altre fonti rinnovabili

Il sole invia sulla Terra una colossale quantità di energia sotto forma di radiazione luminosa. La potenza istantanea che colpisce l'atmosfera terrestre ammonta a 170 milioni di miliardi di watt (170 PW). In pratica, in meno di un'ora il sole invia sulla Terra una quantità di energia pari all'intero consumo complessivo mondiale annuale. Questo flusso di energia solare è molto diluito ed intermittente su scala locale. Quindi la principale sfida scientifica e tecnologica è quella di immagazzinare il gigantesco flusso di energia solare per poi utilizzarlo con "l'intensità" necessaria, laddove richiesto.

A partire dalla radiazione solare è possibile ottenere tutte le forme energetiche utili: calore, elettricità e combustibili.

L'energia eolica è una realtà consolidata e in molti paesi è la tecnologia elettrica in maggiore espansione. La Germania, terza economia mondiale, produce il 10% della sua elettricità mediante la forza del vento.

Un'altra grande risorsa, virtualmente inesauribile, è il calore delle viscere della terra che, fino ad oggi, è stato sfruttato solo a profondità relativamente modeste.

La scelta giusta

La questione energetica mette l'umanità di fronte ad un bivio. Da una parte c'è la difesa ad oltranza dello stile di vita ad altissima intensità energetica dei Paesi ricchi. Uno stile di vita insostenibile nel lungo periodo, che non si fa carico dei danni dell'ambiente, non si cura di ridurre le disuguaglianze, non esclude azioni di forza o addirittura di guerra per conquistare le riserve energetiche residue (oggi di combustibili fossili, domani di uranio), si espone ai rischi della proliferazione nucleare e lascia in eredità alle generazioni future scorie radioattive per migliaia di anni. Scegliere questa strategia vuol dire destabilizzare la società umana. Dall'altra c'è uno sviluppo che vuole rispettare i vincoli fisici del nostro pianeta e che quindi impone uno stile di vita fondato su più bassi consumi energetici, sobrietà, sufficienza, solidarietà.

Chi ha responsabilità di governo, per scegliere gli obiettivi giusti deve guardare lontano. De Gasperi ha scritto che un politico guarda alle prossime elezioni, uno statista guarda invece alla prossima generazione. Per agire come statisti, i politici dovrebbero allora ascoltare più spesso gli scienziati che, avendo minori condizionamenti, possono guardare più lontano.

Come abbiamo visto, uno dei problemi più delicati e più difficili che tutti i paesi, ma in particolare il nostro, hanno oggi di fronte è quello di scegliere fra lo sviluppo dell'energia nucleare e lo sviluppo dell'energia solare e delle altre energie rinnovabili. La decisione che verrà presa a questo riguardo condizionerà non solo la nostra vita, ma ancor più quella dei nostri figli e dei nostri nipoti. Ecco perché nel fare questa scelta è indi-

spensabile che i politici guardino lontano, ascoltando il parere degli scienziati. A questo scopo, assieme a colleghi di altre università e centri di ricerca, abbiamo rivolto un appello al governo che si può consultare sul sito www.energiaperilfuturo.it e che è stato sottoscritto da centinaia di docenti e ricercatori che, in virtù della conoscenza acquisita con i loro studi o con la quotidiana consultazione della letteratura scientifica internazionale, conoscono bene il problema dell'energia. L'appello sottolinea l'urgenza che nel Paese aumenti la consapevolezza riguardo la gravità della crisi energetica e climatica, insiste sulla necessità del risparmio e di un uso più efficiente dell'energia, mette in guardia contro un inopportuno e velleitario rilancio del nucleare e, infine, esorta il governo a sviluppare l'uso delle energie rinnovabili ed in particolare dell'energia solare. L'Italia non ha combustibili fossili e neppure uranio. La sua più grande risorsa è il sole, una fonte di energia che durerà per 4 miliardi di anni, una stazione di servizio sempre aperta che invia su tutti i luoghi della Terra quantità di energia 10.000 volte quella che l'umanità intera consuma. Guardare lontano, quindi, significa sviluppare l'uso dell'energia solare e delle altre energie rinnovabili, non quello dell'energia nucleare. E' un guardare lontano nel tempo, perché non lascia alle prossime generazioni un immane fardello di scorie radioattive. E' un guardare lontano nel mondo, perché, a differenza dei combustibili fossili e dell'uranio, l'energia solare e le altre energie rinnovabili sono presenti in ogni luogo della Terra e, quindi, il loro sviluppo contribuirà al superamento delle disuguaglianze e al consolidamento della pace.

1. N. Armaroli, V. Balzani (2007), The Future of Energy Supply: Challenges and Opportunities, Angew. Chem. Int. Ed., 46, 52.
2. N. Armaroli, V. Balzani (2008), Energia per l'astronave Terra, Zanichelli.
3. N. Armaroli, V. Balzani (2008), Energia: è tempo di scelte strategiche, La Chimica e L'Industria, 9, 138..
4. N. Armaroli, V. Balzani (2010, in press), Energy for a Sustainable World, Wiley-VCH, Weinheim.

QUOTA ASSOCIATIVA S.I.R.R. 2010... E QUELLE ARRETRATE!

Carissimo Socio,
come sai, la quota sociale, oltre ad essere la principale fonte di finanziamento per il funzionamento della nostra Società, è anche un segno annuale di adesione e partecipazione.
La quota sociale, attualmente ad un livello minimo, è un dovere che ogni Socio deve assolvere **entro il 31 marzo** di ogni anno, onde evitare che la gestione delle quote con relativi solleciti e verifiche abbia un costo superiore alla stessa quota.
La quota per il 2010 è di € 30,00 e potrà essere versata tramite assegno circolare o bancario, non trasferibile, intestato a S.I.R.R. oppure tramite versamento in contanti alla Segreteria oppure mediante bonifico bancario: c/c n. 14688 c/o Banca Nazionale del Lavoro 6385 Roma Casaccia Via Anguillarese 301 - 00123 Roma.
Coordinate bancarie IBAN: IT 19T0100503385000000014688
Con l'intento di favorire i cosidetti "non strutturati" (studenti, borsisti, etc.) la quota sociale è ridotta a € 15,00, chi si trova in questa condizione dovrà esplicitamente dichiararlo mediante autocertificazione contestualmente all'invio della quota annuale.
Fiduciosi della tua collaborazione e partecipazione, cogliamo l'occasione per inviarti i nostri più cari saluti.

LA SEGRETERIA

IMPIEGO DEI REATTORI NUCLEARI DI RICERCA NELL'AMBITO DELLA RICERCA NUCLEARE PER APPLICAZIONI ENERGETICHE

Andrea Borio di Tigliole
Dipartimento di Fisica Nucleare e Teorica
direttore del Laboratorio Energia Nucleare Applicata (LENA)
Università degli Studi di Pavia
e-mail: andrea.borio@unipv.it

I reattori nucleari di ricerca attualmente in esercizio sono 238 (principalmente in Russia 48, USA 41, Cina 15, Giappone 13, Francia 12, Germania 11 e Canada 8) mentre 5 nuovi impianti sono in fase di costruzione (2 in Cina, 1 in Francia, 1 in Russia e 1 a Taiwan). I reattori di ricerca ad *alto flusso neutronico* (flusso neutronico > 10^{14} cm^{-2} s^{-1} e potenza ≥ 20 MW) attualmente in esercizio sono 33, tra i quali ben 23 impianti hanno una vita operativa superiore a 30 anni. La maggior parte di questi reattori appartengono alla tipologia dei *Material Testing Reactors* (MTR) e sono stati e sono indispensabili per lo sviluppo della tecnologia degli impianti nucleari. In particolare, il loro contributo è determinante ai fini dell'estensione della vita operativa degli impianti di potenza di seconda generazione (*GEN II*), dello sviluppo di nuovi materiali strutturali e delle verifiche sui combustibili nucleari per gli impianti di potenza di terza generazione (*GEN III*). Sono altresì indispensabili per lo sviluppo di nuovi materiali strutturali in grado di resistere ad alte temperature e ad alte fluenze neutroniche e di combustibili nucleari innovativi per gli impianti di potenza di quarta generazione (*GEN IV*). Il contributo dei reattori MTR è particolarmente importante anche per lo sviluppo della tecnologia dell'energia nucleare da fusione che richiede l'impiego di materiali innovativi in grado di resistere a condizioni operative decisamente critiche quali quelle che si verificano all'interno di un *Tokamak*.

In questo contesto, i reattori ad alto flusso, possono contribuire in modo determinate al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- Screening e selezione di nuovi combustibili nucleari e materiali per applicazioni nucleari;
- Ottimizzazione dei materiali in uso e studio dei loro limiti operativi;
- Studio dei meccanismi di invecchiamento (*aging*) dei materiali in condizioni controllate di temperatura e di fluenza neutronica consentendo la separazione degli effetti;
- Studio del *creep* dei materiali;
- Fornitura di combustibile irraggiato in varie condizioni ai fini dello studio dei nuovi cicli di riprocessamento del combustibile nucleare (ad es. progetto *DOVITA* russo).

In particolare, i Reattori di ricerca ad alto flusso neutronico sono indispensabili per svolgere :

- Test accelerati per lo studio dei danni da irraggiamento nei materiali strutturali: valori tipici sono 2 dpa/y (*displacement per atom/year*) per i reattori *Light Water Reactors* (LWR) di GEN II, 15 dpa/y per i reattori *Gas Fast Reactors* (GFR) e superiori a 30 dpa/y per i reattori *Sodium Fast Reactors* (SFR), entrambi di GEN IV;
- Test accelerati per lo studio del comportamento dei combustibili nucleari dei reattori di potenza di GEN III e GEN IV caratterizzati da elevati tassi di bruciamento (superiori a 60 GWd/ton U) e di dpa/y. In particolare, analisi di sicurezza e di comportamento fisico-chimico dei combustibili durante i transitori di esercizio e incidentali.

Gli Impianti di Potenza di GEN IV (v. Figura 1) richiedono lo sviluppo di nuovi materiali in grado di resistere ad alte temperature e ad alte fluenze neutroniche. Tra le principali *sfide tecnologiche* vi sono:

- Lo sviluppo di matrici composite (ad es. SiCf/SiC) per la realizzazione delle guaine del combustibile dei reattori *Very High Temperature Reactors* (VHTR) e dei GFR;
- Lo sviluppo di acciai Ferritici-Martensitici *Oxyde Dispersion Strengthen* (ODS) per la realizzazione delle guaine del combustibile dei reattori SFR;
- Lo sviluppo di combustibili nucleari innovativi soggetti ad un elevato *burn-up* e all'incorporazione degli Attinidi Minori e dei Prodotti di Fissione a emivita lunga ai fini della trasmutazione delle scorie nucleari.

Tra le principali *sfide scientifiche* si evidenziano:

- Lo sviluppo di nuovi modelli fisici in grado di prevedere l'evoluzione della micro-struttura dei materiali

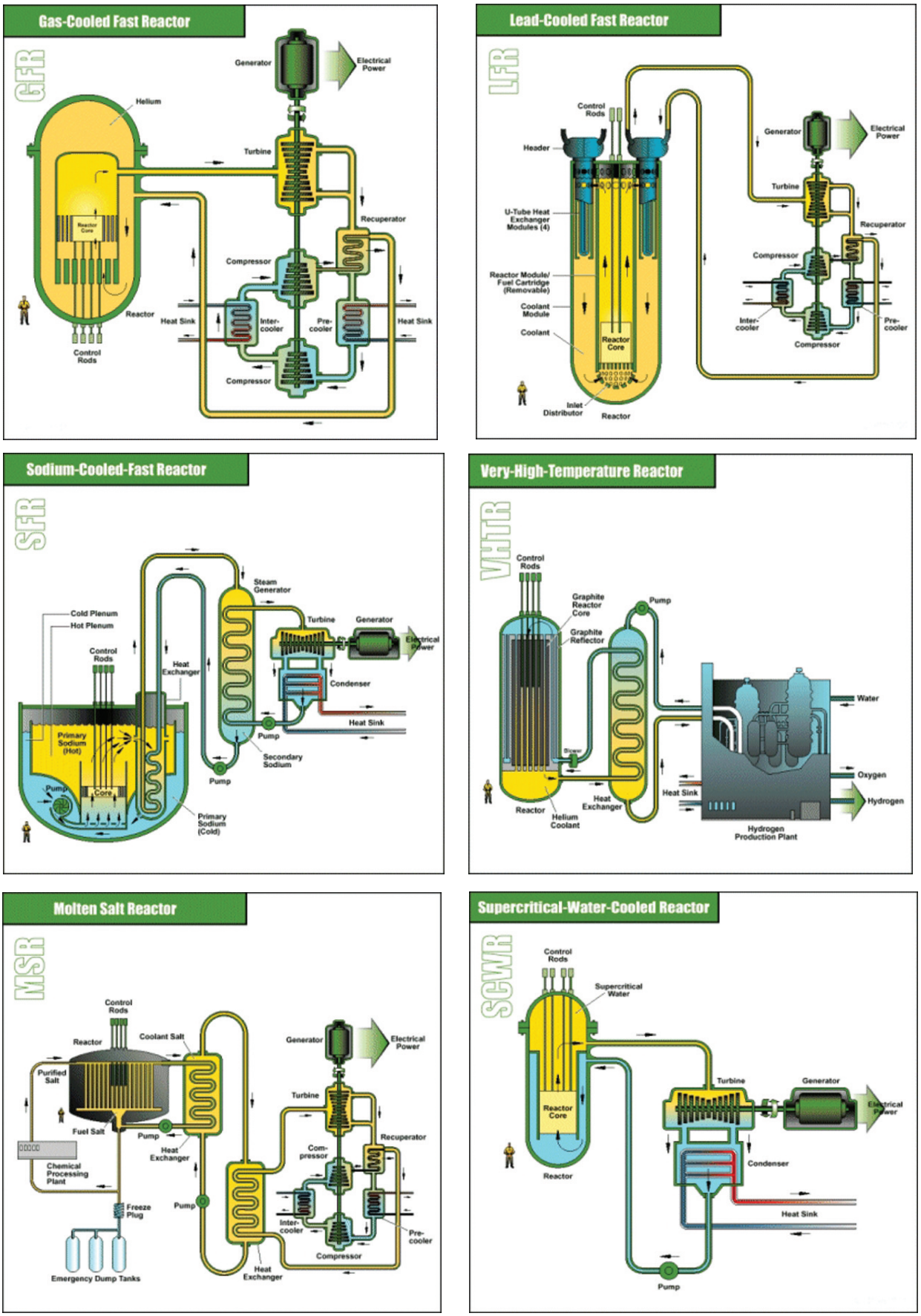


Fig. 1 - Impianti Nucleari di Potenza di GEN IV.

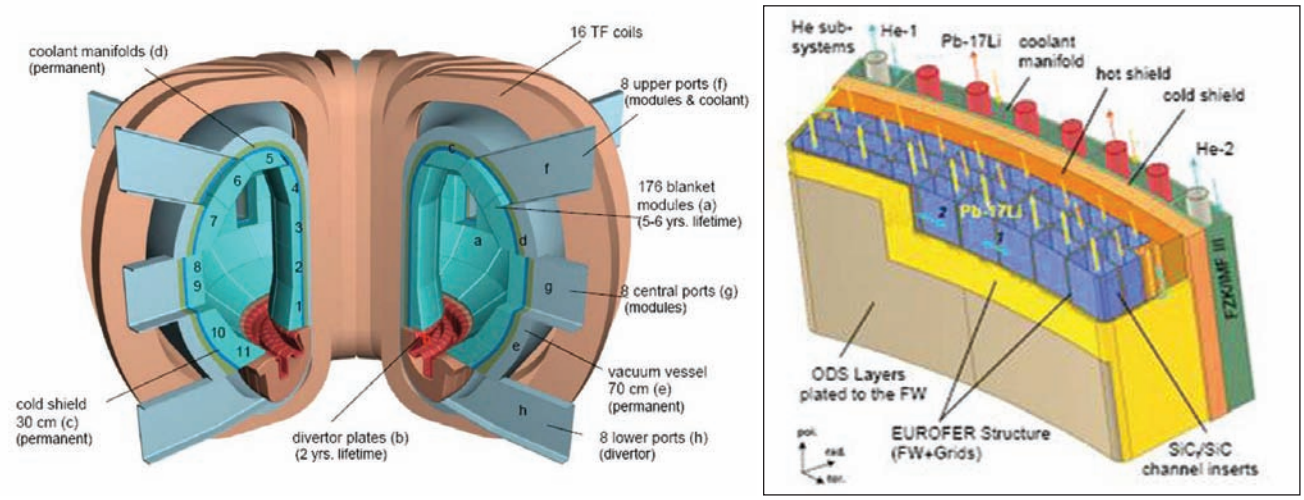


Fig. 2 -Reattore a Fusione Nucleare (Tokamak) e dettaglio della prima parete.

in relazione ai danni indotti dall'irraggiamento (ad es. rilascio nella matrice di Prodotti di Fissione gassosi e di He, ridistribuzione degli Attinidi Minori, etc.);

- Lo sviluppo di nuovi modelli fisici che descrivano le caratteristiche micro-strutturali dei materiali in relazione ai comportamenti meccanici macroscopici (plasticità – *creep* – frattura).

I Reattori di Ricerca ad alto flusso e a spettro neutronico veloce sono particolarmente importanti anche per lo sviluppo di materiali da utilizzare per la costruzione dei Reattori a Fusione Nucleare *Tokamak* (v. Figura 2). Infatti, alcuni materiali impiegati nei Tokamak sono soggetti a danni da irraggiamento estremamente elevati (circa 100 dpa nel corso della loro vita tecnologica). Quindi, tra le principali *sfide tecnologiche* vi sono:

- Lo sviluppo di matrici composite per la realizzazione del mantello (*blanket*) del Tokamak;
- Lo sviluppo di acciai Ferritici-Martensitici ODS per la realizzazione della prima parete del Tokamak.

Anche i Reattori di Ricerca a basso flusso però possono dare un contributo importante alla ricerca nucleare in campo energetico. In particolare per quanto riguarda:

- La diagnostica non distruttiva di materiali e di componenti di piccole dimensioni (ad es. mediante l'applicazione di tecniche di *Neutron Activation Analysis*, di radiografia neutronica, etc.);
- Lo studio del danno da radiazione in componenti elettronici;
- La validazione di calcoli Monte Carlo e di modelli fisici per lo studio degli effetti dell'irraggiamento di nuovi materiali;
- La ricerca di base nel campo della radiochimica;
- Il training di base per *tecnici nucleari* (operatori di esercizio, operatori degli Organismi di controllo, etc.);
- Il supporto alla didattica per la formazione degli studenti universitari.

I Reattori nucleari di Ricerca hanno sostenuto lo sviluppo degli impianti nucleari di potenza di GEN II per oltre trent'anni e saranno determinanti anche per il perfezionamento e lo sviluppo degli impianti di GEN III e di GEN IV e per i futuri impianti nucleari a fusione.

Dato che la maggior parte dei Reattori nucleari di Ricerca attualmente in esercizio ha una vita operativa superiore a 30 anni, anche l'IAEA (International Atomic Energy Agency) sostiene che sarebbe opportuno programmare la costruzione di nuovi reattori di ricerca in grado di supportare per i prossimi decenni la ricerca in campo nucleare.

L'Italia, pur mantenendo importanti collaborazioni di ricerca a livello internazionale, in questi 20 anni ha perso molte competenze nel settore nucleare. Per ripartire con un serio programma nucleare sarebbe indispensabile rafforzare l'infrastruttura nucleare italiana investendo nella ricerca, nella didattica, nella formazione tecnica e professionale, nell'industria e nella comunicazione. In questa prospettiva, proprio per sviluppare nel più breve tempo possibile un'adeguata infrastruttura nazionale, la costruzione in Italia di un nuovo Reattore nucleare di Ricerca di elevata potenza (circa 50 MW) potrebbe essere una importante scelta strategica.

Bibliografia

1. The Generation IV International Forum - http://www.gen-4.org/
2. International Atomic Energy Agency (IAEA) Data Center (NUCLEUS), http://nucleus.iaea.org/NUCLEUS/nucleus/Content/index.html
3. Proceedings of the IAEA "Research Reactor Support Needed for Innovative Nuclear Power Reactors and Fuel Cycle", Vienna 20 – 22 November 2007

LA CONTAMINAZIONE DA ATTINIDI NELL'AMBIENTE: INDIVIDUAZIONE DELLA SORGENTE ATTRAVERSO LA SPETTOMETRIA DI MASSA CON ACCELERATORE

Filippo Terrasi
Dipartimento di Scienze Ambientali - Seconda Università di Napoli
e-mail: filippo.terrasi@unina2.it

Introduzione

Radionuclidi alfa-emettitori antropogenici con tempi di dimezzamento lunghi rispetto alla durata della vita umana sono stati e sono tuttora rilasciati nell'ambiente da test di armi nucleari, incidenti nucleari ed operazioni di riprocessamento del combustibile e di smantellamento di centrali nucleari. Fra questi i più significativi sono il ^{239,240}Pu e ^{236}U [1,2]. Quantificare questi rilasci e tracciare la loro dispersione nell'ambiente è stato tradizionalmente l'obiettivo della spettrometria α (AS) o, più recentemente, della spettrometria di massa a ionizzazione termica (TIMS) o a plasma accoppiato induttivamente (ICP-MS). Sebbene queste siano metodologie mature, ciascuna ha le sue limitazioni, che sono largamente superate dalla relativamente nuova tecnica della Spettrometria di Massa con Acceleratore (AMS).

In Italia non vi sono centrali nucleari (Nuclear Power Plants, NPP) in esercizio, ma le quattro centrali dismesse sono in fase di smantellamento ed i progressi delle tecnologie nucleari hanno indotto il nostro Paese a rivedere la propria politica energetica, programmando per il prossimo futuro l'installazione di NPP di nuova generazione. Sia le operazioni di decommissioning delle centrali esistenti sia la eventuale futura costruzione ed esercizio di nuove centrali richiedono indagini accurate sulla contaminazione da rilasci radioattivi dei siti nucleari, del territorio circostante e dei materiali strutturali delle NPP. L'attività di controllo da parte degli Enti preposti utilizza tecniche radiometriche standardizzate, ma si fa sempre più pressante, anche a livello internazionale, la richiesta di metodologie ultrasensibili per la rivelazione e quantificazione di radionuclidi cosiddetti di difficile rivelabilità. Tra questi, gli isotopi degli attinidi α-emettitori costituiscono i radionuclidi più critici per la loro tossicità, non solo radiologica; i metodi di AS, a causa delle vite medie molto lunghe, non offrono le necessarie sensibilità (tipicamente circa 50 μBq) e, in qualche caso (p.e. ^{239}Pu-^{240}Pu), risoluzione.

D'altra parte, le tecniche di spettrometria di massa convenzionali hanno potenzialmente sensibilità più elevate, ma si scontrano con il problema delle interferenze molecolari (p.e. ^{239}Pu-^{238}UH-^{208}Pb^{31}P).

In questo articolo viene presentato lo stato di avanzamento del progetto, svolto in collaborazione tra l'Università Federico II, la Seconda Università di Napoli e la SoGIN, che si propone di mettere a punto una metodologia di misura ultrasensibile di concentrazioni ed abbondanze isotopiche di U e Pu e di caratterizzare, dal punto di vista della contaminazione da U e Pu, sia campioni ambientali prelevati intorno alla centrale nucleare del Garigliano sia campioni rappresentativi dei materiali strutturali dell'edificio e dell'impianto del reattore della stessa centrale. L'obiettivo è quello di caratterizzare la eventuale contaminazione del sito da radionuclidi di difficile rilevabilità e, nel contempo, di disporre di uno strumento in grado di soddisfare le esigenze analitiche dell'IAEA per la conduzione di campagne per le salvaguardie nucleari contro attività nucleari clandestine e l'uso militare di armamenti con Uranio depleto.

Le sorgenti di contaminazione da Attinidi e la loro rivelazione

La produzione degli isotopi degli attinidi a lunga vita media ha luogo, a partire dagli isotopi naturali dell'U, in tutti gli ambienti in cui sia presente un flusso di neutroni. Nelle miniere di U i neutroni prodotti da reazioni (α,n) indotte dalle particelle α emesse da radionuclidi naturali inducono reazioni di cattura radiativa sull'^{235}U che conducono alla produzione di piccole quantità di ^{236}U ($T_{1/2}$=2.3·10^{7}yr). I risultanti rapporti isotopici naturali ^{236}U/^{238}U sono compresi tra 2·10^{-13} e 7·10^{-11} [3], e non sono misurabili con tecniche conven-

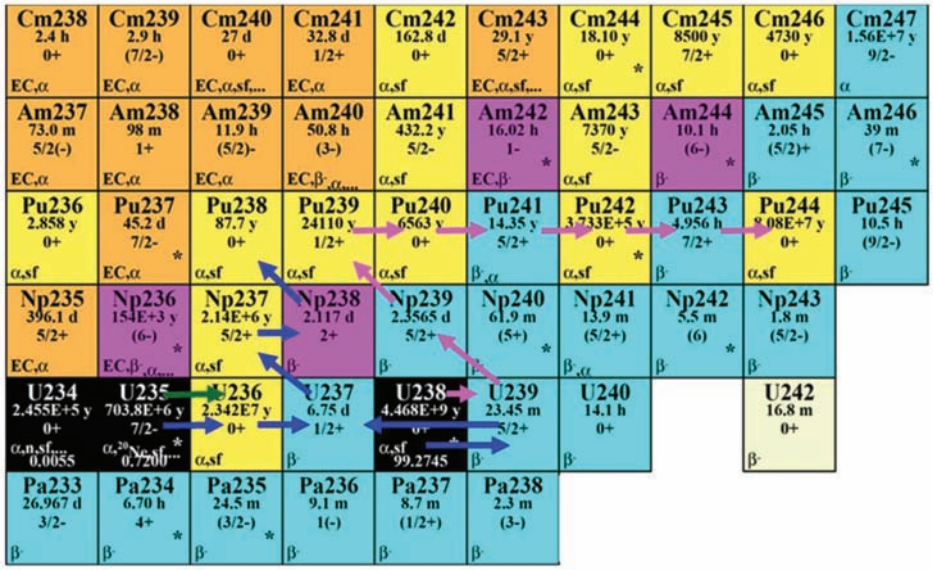


Fig. 1 - Porzione della tavola degli isotopi che mostra le vie di produzione di alcuni degli isotopi degli attinidi (^{236}U, in verde; ^{238}Pu in blu; altri isotopi del Pu in ciano): frecce orizzontali: cattura neutronica; frecce oblique: decadimento β.

zionali. In ambienti in cui i flussi di neutroni sono più elevati, catene di reazioni di cattura alternate a decadimenti β conducono alla produzione degli isotopi del Pu, secondo lo schema illustrato in figura 1.

Le abbondanze isotopiche in diverse matrici dipendono quindi dalla storia del combustibile e dal suo arricchimento iniziale. Valori tipici del rapporto isotopico $^{236}U/^{238}U$ del combustibile irraggiato sono compresi tra 10^{-4} e 10^{-2}: si comprende come anche una piccolissima contaminazione di un ambiente naturale da combustibile irraggiato conduca a enormi variazioni del rapporto isotopico rispetto al valore "naturale", facendo della sua misura una segnatura sensibilissima della contaminazione. Per ciò che riguarda tale isotopo raro, ci si prefigge di raggiungere una sensibilità di 10^{-12} nella misura del rapporto isotopico e di 1 ng nella misura della concentrazione di U in campioni caratterizzati da rapporti isotopici di circa 10^{-8}.

Gli isotopi del Pu, per il quale non esiste un isotopo abbondante (quasi)stabile come nel caso dell'U, sono presenti in diversi contesti con abbondanze simili tra loro: in quanto materiale fissile il ^{239}Pu è l'isotopo più abbondante in plutonio "weapon-grade".

Tipicamente, il rapporto $^{240}Pu/^{239}Pu$ prima della detonazione è ≤ 0.07 mentre dopo la detonazione è ≈ 0.35. Nel fallout, $^{240}Pu/^{239}Pu$ varia in dipendenza dei parametri del test nel range 0.10-0.35, mentre $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ varia tra 0.025 e 0.04 [4]. La media di $^{240}Pu/^{239}Pu$ nell'emisfero Nord è ≈ 0.18. Valori significativamente differenti, 0.035-0.05, si trovano nei sedimenti degli atolli Mururoa e Fangataufa [5], a causa delle diverse caratteristiche degli esperimenti nucleari francesi.

Nei reattori nucleari, a causa della differente composizione del combustibile, dell'arricchimento dell'uranio e del livello di *burn-up*, le abbondanze relative degli isotopi del Pu sono diverse: $^{240}Pu/^{239}Pu$ aumenta con il tempo di irradiazione: nei casi tipici il rapporto $^{240}Pu/^{239}Pu$ è dell'ordine di 0.13, confrontabile quindi con quello tipico del fallout da esplosioni nucleari; d'altra parte $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ vale circa 0.45, consentendo una chiara distinzione tra le due possibili provenienze [6].

Riassumendo, possiamo dire che le vite medie di molti isotopi degli attinidi rendono la rivelazione radiometrica molto problematica in quanto essa richiede sensibilità molto elevate. Inoltre, diverse sorgenti possono contribuire simultaneamente alla contaminazione, ma la composizione isotopica di ciascun elemento è molto diversa a secondo della sua origine e della sua storia.

Per ciò che riguarda la rivelazione di tracce di isotopi degli attinidi in campioni ambientali o strutturali, se consideriamo la AS per la rivelazione del ^{239}Pu, supponendo un'efficienza di rivelazione del 50% ed un tempo di conteggio di un mese, si ottengono 64 conteggi (con un errore statistico del 12%) con 50 μBq di attività, che corrispondono a circa 40 milioni di atomi, ovvero circa 15 fg. Va inoltre considerato che le righe alfa di decadimento del ^{239}Pu e ^{240}Pu sono separate di 11 keV a 5.25 MeV, cioè meno della risoluzione tipica di un rivelatore al Si: ciò implica che non può essere ottenuta alcuna informazione sul rapporto $^{240}Pu/^{239}Pu$. D'altra parte l'AS è l'unica tecnica in grado di separare il ^{238}Pu dall'isobaro ^{238}U, in quanto la concentrazione di ^{238}U è tipicamente 6-9 ordini di grandezza superiore a quella del ^{238}Pu, mentre la purificazione chimica che si può ottenere porta ad un fattore di pulizia di circa 10^3. Considerazioni analoghe, per ciò che riguarda il limite di sensibilità, valgono per l'^{236}U: in questo caso la costante di decadimento 100 volte più piccola comporta un fattore 100 sulla minima quantità rivelabile. In

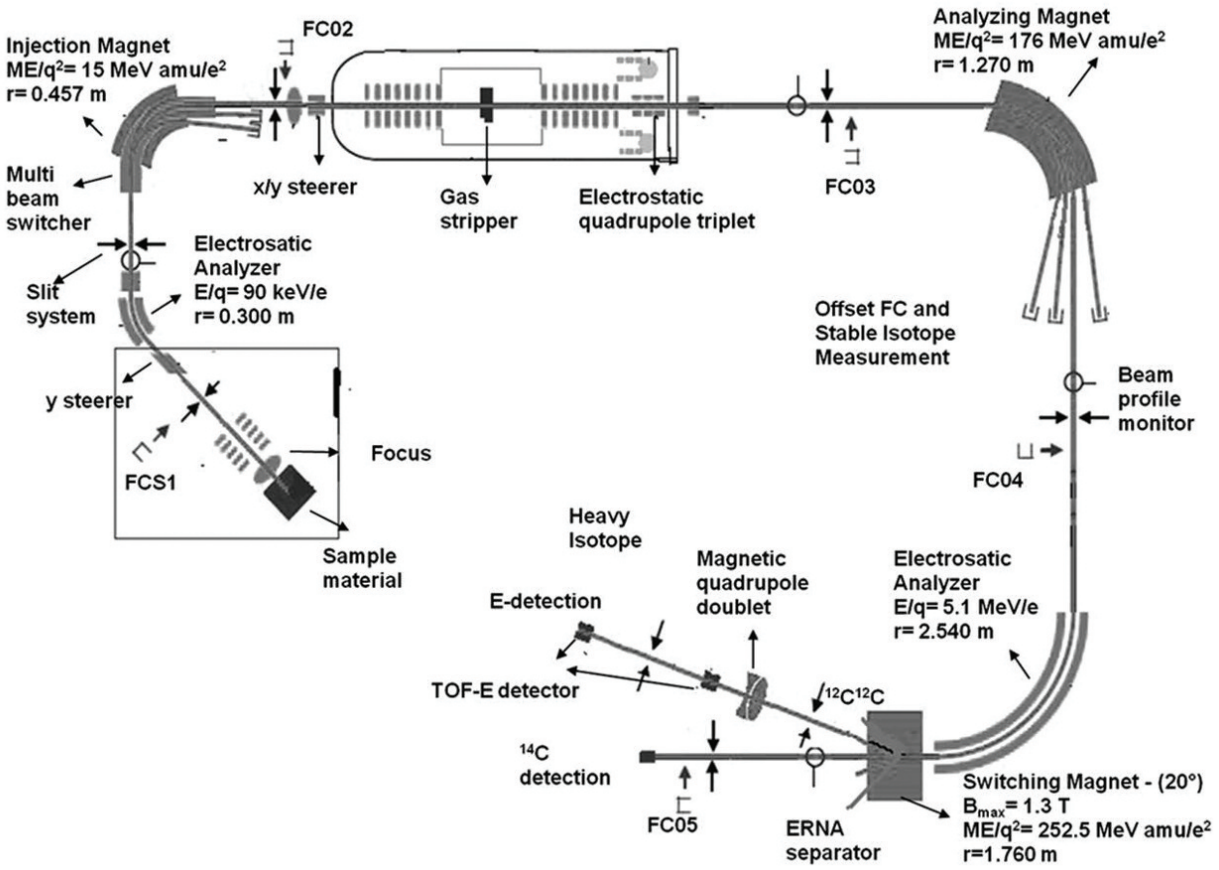


Fig. 2 - Layout del sistema AMS CIRCE in cui sono evidenziati il magnete di switching installato e la linea di fascio dedicata alla Spettrometria di Massa con Acceleratore degli Attinidi.

conclusione, mentre la AS mostra limitazioni severe per ciò che riguarda i limiti di sensibilità, rimane insostituibile per la misura del rapporto $^{238}Pu/^{239}Pu+^{240}Pu$. L'alternativa alla AS che può consentire la rivelazione di piccole concentrazioni di ^{236}U e degli isotopi del Pu è quindi la Spettrometria di Massa, che rivela gli atomi presenti nel campione piuttosto che il loro infrequente decadimento. Le tecniche più usate per la misura degli attinidi sono la ICP-MS e la TIMS. La sensibilità dell'ICPMS si ferma ad un valore del rapporto $^{236}U/^{238}U$ pari a 10^{-7}, a causa della formazione di idruri [7]. Inoltre, a causa dell'interferenza tra $^{238}UH+$ e il ^{239}Pu, la misura del rapporto $^{240}Pu/^{239}Pu$ richiederebbe per l' ICPMS una decontaminazione del plutonio dall'uranio molto spinta. Quanto agli isotopi del Pu, per l'ICP-MS le interferenze con specie poliatomiche limitano la sensibilità a livello della frazione di pg quando il campione non è sufficientemente puro. Per contro, la TIMS offre il vantaggio legato ai differenti potenziali di ionizzazione di U e Pu, per cui il Pu lascia il filamento a temperature più basse dell'U. In tal modo, sono stati ottenuti limiti di rivelabilità di circa 1 fg per il ^{239}Pu, corrispondenti a circa 2 μBq [8].

Rivelazione con AMS e upgrade del sistema CIRCE

La Spettrometria di Massa con Acceleratore è la sola tecnica in grado di ottenere la sensibilità elevata necessaria insieme ad un'ineguagliata soppressione delle interferenze isobariche molecolari per la rivelazione degli isotopi rari di elementi con isotopi quasi-stabili con abbondanze isotopiche più grandi di molti ordini di grandezza, come l'U. Le prime misure AMS degli attinidi sono state affrontate dal lavoro pionieristico del laboratorio IsoTrace di Toronto (CA) [9,10], dove fu misurato il contenuto di ^{236}U in una miniera di U. Inoltre, le rese relative degli isotopi del Pu furono determinate alla tensione di 1.25 MV. Successivamente, presso l'Australian National University [11,12] l'utilizzazione di una tensione al terminale più elevata (4 MV) ha consentito di migliorare la sensibilità del metodo. Sistemi di rivelazione simili sono stati realizzati al Lawrence Livermore National Laboratory (USA) [13], all'ANSTO (AUS) [14], al Vienna Environmental Reasearch Accelerator [15] e, ad energie molto più basse, all'ETH di Zurigo [16]. Due recenti lavori di rassegna [1,17] presentano i risultati ottenuti con i sistemi AMS attivi nel campo degli attinidi. In estrema sintesi, i due sistemi che puntano alla migliore sensibilità sulla misura del rapporto isotopico (VERA e ANU) hanno mostrato che è possibile raggiungere una sensibilità di 10^{-12} per l'^{236}U su campioni contenenti circa 1 mg di U. I laboratori dell'ANSTO e del LLNL quotano inve-

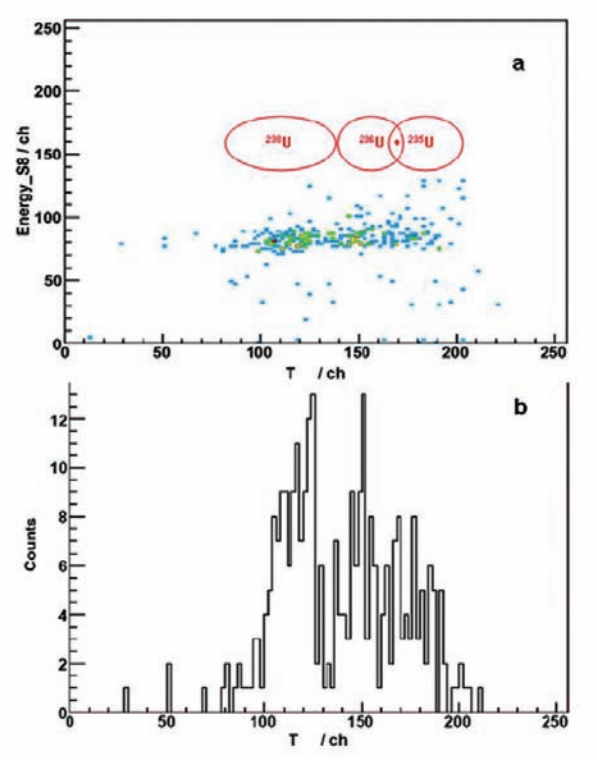


Fig. 3 - Matrice di identificazione degli isotopi dell'U energia – tempo di volo (a). Proiezione della matrice sull'asse del tempo di volo (b).

ce una sensibilità di circa 10^{-8} su quantità dell'ordine del ng. In entrambi i casi questi limiti superano di alcuni ordini di grandezza quelli che caratterizzano la AS e la MS convenzionale.
Il sistema AMS sviluppato presso l'acceleratore tandem da 3 MV del laboratorio CIRCE (figura 2) è basato sull'acceleratore Pelletron 9SDH-2 della NEC, descritto in [18-21]. Gli ioni negativi prodotti da una sorgente multisample di tipo sputtering sono analizzati in massa da un magnete a doppia focalizzazione caratterizzato da un rapporto $ME/Z^2 = 15$, che permette un'analisi in massa ad alta risoluzione di tutti gli isotopi stabili della tavola periodica. La stabilizzazione della tensione di terminale è ottenuta con un feedback del GVM sul sistema di carica ad alta tensione; la stabilità a lungo termine è migliore di 1 kV picco-picco. Lo stripper ad argon funziona ad una pressione di lavoro di $1{,}3\cdot10^{-2}$ mbar. Il magnete per l'analisi a 90° del fascio accelerato ha un ME/Z^2 di 176 e un rapporto $M/\Delta M$ di 725. Ciò comporta, per esempio, che $^{236}U5^+$ a 3 MV può essere analizzato con uno spot del fascio di 3,5 mm. Il sistema è completato da due analizzatori elettrostatici funzionanti a ±40 kV, con una risoluzione energetica $E/\Delta E = 700$, da un magnete di switching e dalla linea di fascio dedicata, comprendente un sistema a tempo di volo (TOF-E) con un rivelatore di start a microchannel plate ed un rivelatore di stop al Si estraibile dalla linea di fascio. Per la rivelazione del Pu, che non richiede l'uso del sistema TOF, è utilizzata una camera a ionizzazione posta a valle del rivelatore di stop.
La figura 3 mostra un esempio di matrice tempo di volo – energia, che permette la separazione degli ioni di ^{236}U dagli isotopi interferenti ^{235}U e ^{238}U che originano da processi di scambio carica di ioni prodotti dalla rottura nello stripper di specie molecolari della stessa massa di quella iniettata nell'acceleratore ($^{236}U^{16}O^-$).
I limiti di sensibilità raggiunti con la configurazione attuale del sistema, per ciò che riguarda l'^{236}U, sono di $2\cdot10^{-11}$ per il rapporto isotopico $^{236}U/^{238}U$, e di 20 μg di U, corrispondenti a 200 fg di ^{236}U (~ 5×10^8 atomi), per la concentrazione [22,23].

Per la rivelazione degli isotopi del Pu viene utilizzata una camera a ionizzazione che, per ciascuna regolazione del sistema di trasporto del fascio sulle varie masse (con l'eccezione del ^{238}Pu), consente una chiara identificazione delle specie accelerate.
L'efficienza di estrazione e rivelazione del Pu è attualmente di $5\cdot10^{-3}$ cps/fg, che limita la sensibilità a ≈ 100 fg di Pu. Un miglioramento della chimica di estrazione del Pu è in corso, al fine di abbassare questo limite, dato che il fondo interferente proveniente dalla contaminazione di U nel campione è attualmente al livello di 0.1 fg di ^{239}Pu per 500 ng di U. In figura 4 questa figura di merito è mostrata, in confronto con analoghi risultati ottenuti in altri due laboratori: i dati sono stati ottenuti regolando il sistema AMS per la misura nel rivelatore finale dell'isotopo ^{239}Pu ed utilizzando campioni privi di Pu cui è stata aggiunta una quantità nota di U rappresentata sull'asse orizzontale.
In ordinata, per ciascun valore di tale massa aggiunta, è stata riportata la massa di ^{239}Pu che sarebbe stata determinata a partire dal numero di conteggi dovuti in realtà all'interferenza dell'^{238}U. Il fondo caratteristico del sistema CIRCE è di due ordini e quattro ordini di grandezza inferiore a quello dei sistemi dell'ANU e dell'ANSTO, rispettivamente. Questa performance è attribuibile alla presenza, nel sistema CIRCE, di un analizzatore elettrostatico a monte del magnete di iniezione che incrementa la definizione della selezione di massa all'iniezione.

Conclusioni

La Spettrometria di Massa con Acceleratore (AMS) è caratterizzata da un'eccezionale sensibilità nella misura di rapporti isotopici e dalla completa soppressione di specie ioniche molecolari. A seconda del nuclide di interesse, il limite di rivelazione per radioisotopi pesanti a lunga vita media può essere molti ordini di grandezza al di sotto di quello della spettrometria di massa convenzionale (TIMS e ICP-MS). Rispetto al conteggio radioattivo, la spettrometria di massa consente di misurare rapporti isotopici molto piccoli di nuclidi a lunga vita media contando direttamente gli

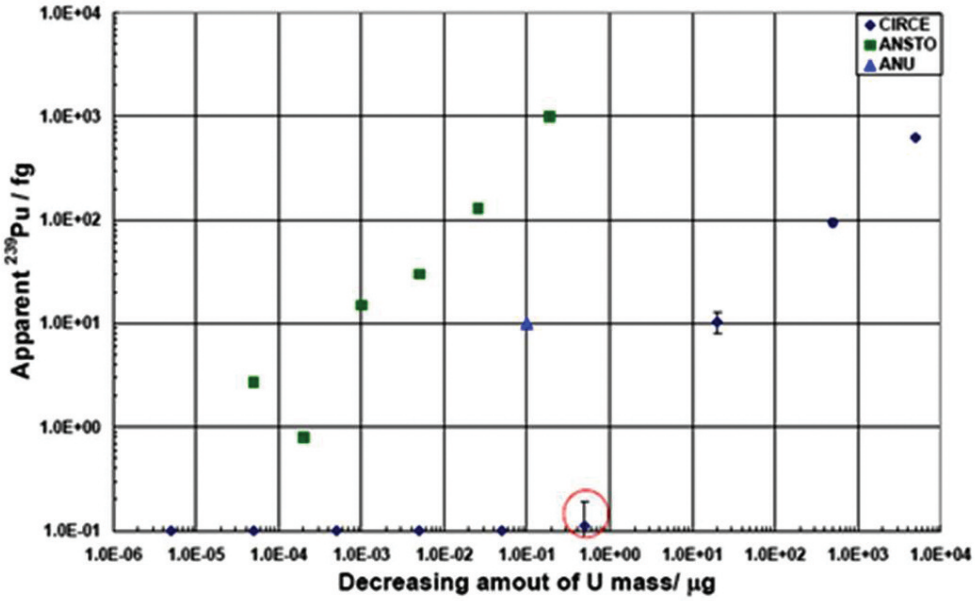


Fig. 4 - Massa apparente di ^{239}Pu rivelata dal sistema AMS da un campione privo di Pu a cui è stata aggiunta una quantità variabile di U.

atomi invece che il loro raro decadimento: per gli attinidi l'AMS può fornire un'efficienza di rivelazione più alta della spettrometria alfa se la vita media è più lunga di circa 1000 anni. L'elevata sensibilità dell'AMS estende il suo campo di applicazione a quasi tutti i comparti ambientali, nei quali sono presenti molti radionuclidi di questo tipo, sia di origine naturale che antropogenica.

La determinazione dei rapporti isotopici di U e Pu costituisce un potente mezzo di identificazione della sorgente della contaminazione, oltre che della sua entità. Presso il Center for Isotopic Research on Cultural and Environmental Heritage è in fase avanzata di realizzazione un sistema di analisi AMS per gli isotopi degli Attinidi. I livelli di sensibilità raggiunti finora sono già di poco superiori a quelli tipici dei pochi sistemi dello stesso tipo operanti nel mondo. E' in corso un'attività di ottimizzazione dei parametri di funzionamento che consentirà di mettere a disposizione della comunità scientifica internazionale un sistema di analisi ultrasensibile, sia nel settore della ricerca ambientale che in quello delle salvaguardie nucleari.

Bibliografia

1. P. Steier et al, Nuclear instruments & Methods in Physics Research, B266 (2008) 2246
2. F.Quinto et al, Applied Radiation and Isotopes 67,10 (2009) 1775
3. Wilcken et al,, Nuclear instruments & Methods in Physics Research, B259 (2007) 727
4. M. Koide et al, Earth Planetary Science Letters, 1 (1985) 72.
5. R. Chiappini et al,, Science of Total Environment, 237 (1999) 269.
6. L. Skipperud and D. H. Oughton, Environment international 30 (2004) 815.
7. S.F. Boulyga, K.G. Heumann, Journal of Environmental Radioactivity, 88 (2006) 1
8. N.L. Elliot et al,, Journal of Radioanalitical Nuclear Chemistry 267 (2006) 637
9. X.L. Zhao et al, Nuclear instruments & Methods in Physics Research, B92 (1994) 249
10. X.L. Zhao et al, Nuclear instruments & Methods in Physics Research, B126 (1997) 29
11. L.K.Fifield et al, Nuclear instruments & Methods in Physics Research, B117 (1996) 295
12. L.K.Fifield et al, Nuclear instruments & Methods in Physics Research B123 (1997) 400
13. T.A.Brown et al, Nuclear instruments & Methods in Physics Research, B223 (2004) 788
14. M.A.C. Hotchkis et al, Nuclear instruments & Methods in Physics Research B172 (2000) 659
15. P. Steier et al, Nuclear instruments & Methods in Physics Research B188 (2002) 283
16. L. Wacker et al, Nuclear instruments & Methods in Physics Research, B240 (2005) 452
17. L.K.Fifield, Quaternary Geochronology 3 (2008) 276
18. F. Terrasi et al, Nuclear instruments & Methods in Physics Research, B259 (2007) 14
19. I. Passariello et al, Radiocarbon 49 (2007) 225 20. F. Marzaioli et al, Radiocarbon 50 (2008) 139
21. F. Terrasi et al, Nuclear instruments & Methods in Physics Research, B266 (2008) 2221
22. M. De Cesare et al, Nuclear instruments & Methods in Physics Research, B (2009)
23. M. De Cesare et al, Radiocarbon 2010, accepted.

New MOBETRON®

INTRAOP

MD 51

- 17% reduction in length (30 cm)
- 23% lighter overall (total weight appr. 1000 Kg)
- Single phase
- Lower power consumption
- New gun control
- New High Voltage system
- New smaller transport system
- Shorter head

We know IORT

info@md51.com www.md51.com