Rendiconti Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL
Memorie di Scienze Fisiche e Naturali
ISBN 987-88-548-6284-5
DOI 10.4399/97888548628452
pag. 21–37

Situazioni e compiti del nucleare, internazionali e nazionali

Maurizio Luigi Cumo

1. Il nucleare nel mondo oggi

— 437 reattori nucleari di potenza in esercizio.
— 371.762 MWe potenza totale installata netta.
— 3 reattori in fermata prolungata.
— 64 reattori di potenza in costruzione.

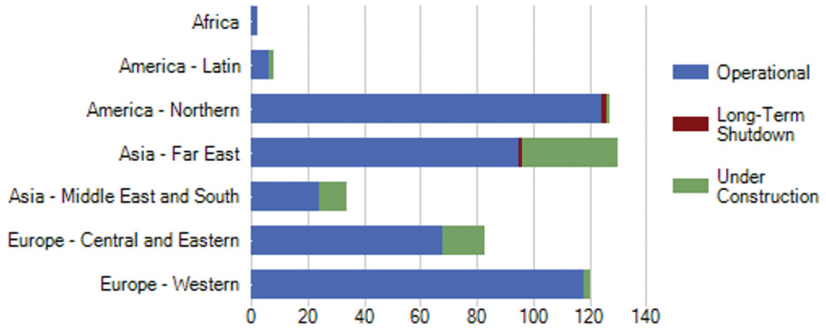

Figura 1. IAEA 1 novembre 2012

2. L'evoluzione nel 2012

— Connessioni di nuovi reattori alla rete elettrica
  – SHIN–WOLSONG–1 (960 MW(e), PWR, KOREA REP.) on 27 January

  - SHIN–KORI–2 (960 MW(e), PWR, KOREA REP.) on 28 January

— Riavvii dopo lunghi fuori servizio

  - BRUCE–1 (772 MW(e), PHWR, CANADA) on 19 September
  - BRUCE–2 (772 MW(e), PHWR, CANADA) on 16 October

— Avvio di costruzione di nuovi reattori

  - BALTIISK–1 (1082 MW(e), PWR, RUSSIA) on 22 February
  - SHIN–ULCHIN–1 (1340 MW(e), PWR, KOREA REP.) on 10 July
  - BARAKAH 1 (1340 MW(e), PWR, UAE) on 18 July

— Chiusure definitive

  - OLDBURY–A1 (217 MW(e), GCR, UK) on 29 February
  - WYLFA 2 (490 MW(e), GCR, UK) on 25 April

— Programmi di costruzione cancellati

  - BELENE–1 (953 MW(e), PWR, BULGARIA) on 28 March
  - BELENE–2 (953 MW(e), PWR, BULGARIA) on 28 March

IAEA 1 novembre 2012

3. In sintesi la situazione

— 64 reattori sono in costruzione in 13 Paesi.
— *Life extension* e *uprating* contribuiscono ad una capacità sempre maggiore del nucleare.
— Nel 2011 il nucleare ha contribuito per il 13,5% alla produzione elettrica mondiale.
— L'IEA prevede entro il 2035 un aumento del 60% della capacità elettrica da fonte nucleare nel mondo (principalmente negli ex Paesi in via di sviluppo) con una produzione che raggiungerà i 36 miliardi di MWh.

4. Gli sviluppi futuri

— Oltre i 64 reattori in costruzione ve ne sono 160 pianificati e 320 proposti.
— Diversi fattori hanno rallentato, ma non cancellato molti progetti: l'incidente di Fukushima; la crisi economica mondiale; l'andamento dei prezzi di petrolio, gas e carbone; le politiche contro l'effetto serra; ecc.

5. Alcuni esempi specifici

— USA – progetti per 13 reattori.
— Canadà – Progetti per 2.200 MWe a Darlington.
— Francia – 1 reattore in costruzione ed uno in progetto (Penly).
— UK – 4 unità da oltre 1500 MWe in esercizio entro il 2019 ed altri 6000 MWe proposti.
— Romania – Altri 2 CANDU in esercizio entro il 2017.
— Slovacchia – 2 unità VVER completate entro il 2013.
— Bulgaria – 1 reattore a Kozloduy.
— Ukraina – 2 nuovi reattori in esercizio entro il 2019.
— Russia – 11 reattori in costruzione e altri 14 in programma.
— Polonia – 2 centrali da 3000 MWe in progetto.
— Cina – 26 reattori in costruzione e molti di più in progetto.
— India – 7 reattori in costruzione.

In Giappone, l'uscita dal nucleare era stata fissata prima al 2030, poi al 2040 ed ora è rimasto un obiettivo molto flessibile, mentre viene autorizzato il completamento delle centrali attualmente in costruzione.

6. Ricerche nazionali sulla sicurezza dei reattori

Vi è stato un periodo iniziale, anni '70–'80, in cui per la progettazione dei reattori, tenuto conto di tutti gli incidenti possibili, era necessario disporre di nuove correlazioni rispetto a quelle sino allora impiegate per gli impianti di potenza convenzionali. Queste richiedevano conferme sperimentali in situazioni estreme e con attrezzature costose che

vedevano impegnati fondi governativi dei maggiori Paesi dei blocchi contrapposti.

Siamo stati fra i primi, con risorse ben più ridotte, a investigare condizioni termofluidodinamiche critiche quali potenze termiche di *burn–out* con transitori rapidissimi di portata per simulare improvvise rotture nei condotti di refrigerazione dei reattori, picchi di potenza per simulare incidenti di reattività e depressurizzazioni improvvise.

Impiegando freon come sostituto dell'acqua e allestendo circuiti più piccoli con potenze ben minori di quelle in giuoco nei reattori, e considerando quattro grandezze quali la potenza termica scambiata, la portata refrigerante, la pressione e la temperatura abbiamo variato una alla volta tali grandezze, anche in maniera rapidissima, registrando i risultati. Successivamente abbiamo variato due o tre grandezze in maniera simultanea, impiegando anche visualizzazioni con cinematografia ultrarapida per avere ulteriori dati per comprendere l'evoluzione dei fenomeni.

L'interpretazione fisica di queste misure, lo studio dei deflussi bifase per poter validare al meglio le correlazioni di progetto ricercate in una competizione internazionale con americani ed europei è stata molto impegnativa, ma utile anche per ulteriori scambi di informazioni che hanno valorizzato l'attendibilità delle nostre ricerche e dei codici di calcolo conseguenti. Altre ricerche sperimentali e codici di calcolo hanno riguardato i cosiddetti reattori piccoli e medi a sicurezza intrinseca, cogeneratori di elettricità e calore per dissalare acqua di mare o per teleriscaldamento, che hanno portato alla progettazione del reattore MARS, registrato nella serie INPRO (*International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles*) dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica IAEA dell'ONU. Tale reattore è montabile e smontabile a pezzi collegati fra loro, ed è tutto in acciaio.

Le nostre ricerche sulla sicurezza nucleare si sono integrate internazionalmente con quelle sulla cosiddetta "difesa in profondità", con i tre livelli fondamentali di misure preventive, protettive e mitigative mediante una indagine complessa sulle catene incidentali concepibili per rotture di componenti o fallimenti dei dispositivi di sicurezza. Tali ricerche hanno portato alla valutazione dei livelli di sicurezza raggiungibili dalle successive generazioni di reattori, da 10^{-5} a meno di 10^{-7} / reattore.anno per la fusione dei noccioli.

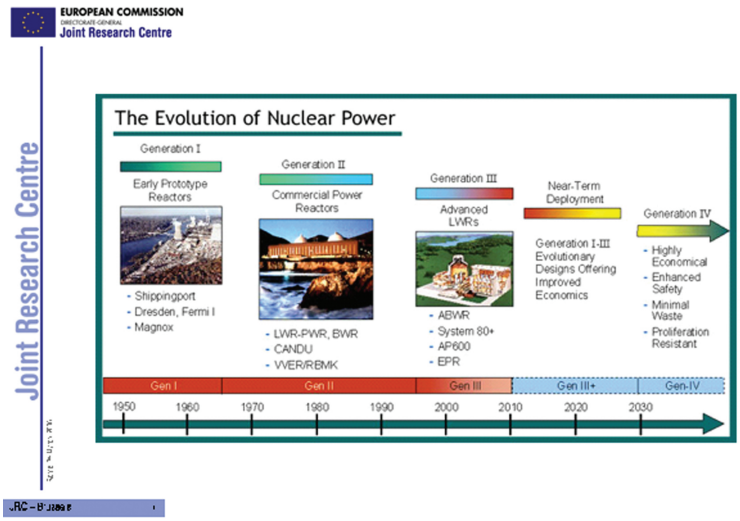

Figura 2

7. Reattori della generazione III+ e loro caratteristiche ai fini della sicurezza nucleare

Essi presentano livelli di sicurezza decisamente maggiorati e sono destinati a ricoprire il *gap* di potenza nucleare necessaria in attesa dell'utilizzo dei reattori nucleari di IV generazione. Al loro progetto è stato richiesto dalle Autorità di Sicurezza di poter resistere, senza fusione del nocciolo, a condizioni esterne (terremoti, allagamenti, situazioni metereologiche estreme, molto più gravi di quelle che erano richieste per i reattori della III generazione) nonché (11 settembre 2001) a tali atti di terrorismo gravissimi, compresi attentati informatici al delicato e complesso sistema di controllo. Inoltre è stato richiesto di affrontare l'incidente più grave concepibile, la fusione dell'intero nocciolo, assicurando la rimozione del calore residuo di decadimento radioattivo e una tenuta sostanziale di tutta la radioattività che si libererebbe entro un doppio involucro del loro contenitore esterno, con una conseguente zona molto ridotta della superficie esterna da dover poi evacuare per breve tempo e quindi da decontaminare.

In tali casi si avrebbe, con una probabilità remota, più piccola di 10^{-7}/reattore.anno, un danno economico gravissimo per la società elettrica proprietaria, evitando però una grave contaminazione del

territorio. La probabilità piccolissima rientra in una valutazione economica del rischio finanziario che le società elettriche proprietarie ritenessero di poter affrontare.

8. Reattori della IV generazione

Si prevedono in esercizio commerciale per gli anni '40. Ad essi sono richiesti livelli di sicurezza almeno pari a quelli della generazione III^+ e prestazioni superiori per quanto riguarda rendimenti e costi. Particolarmente interessanti sono i reattori "veloci" a ciclo chiuso (ciclo uranio–plutonio refrigerati a sodio, piombo o elio) per il semplice fatto, che è già stato scientificamente dimostrato, che con essi la percentuale di energia estratta dall'uranio salirebbe dallo 0,6%, che si ottiene dai reattori della II e III generazione, e dallo 0,8% che si raggiunge con i reattori della generazione III^+ fino al 70%. Ciò significa moltiplicare per 100 l'energia immagazzinata nelle risorse di uranio (che ai consumi attuali potrebbero durare una sessantina di anni). Ma vi è un altro grande vantaggio: con questi reattori della IV generazione si può ridurre di 100 volte il quantitativo di attinidi minori (americio, curio e nettunio), che hanno vite radioattive lunghissime con grande attività, perché tali elementi sono fissionati dai neutroni "veloci", a grande energia, caratteristici appunto dei reattori veloci.

Questo significa ridurre di 100 volte gli spazi necessari nei depositi geologici profondi che oggi sono indispensabili per i combustibili irraggiati provenienti dai cicli aperti.

9. Incidente di Fukushima, programmi di *stress tests* e cenno ai loro risultati

Le Autorità di Sicurezza nucleare di nove Stati dell'Unione Europea (Regno Unito, Italia, Germania, Svezia, Belgio, Olanda, Spagna, Francia, Finlandia) si sono dal 1998 riunite per creare una associazione denominata WENRA (Western European Nuclear Regulators' Association) con lo scopo di scambiarsi utili informazioni per accrescere le rispettive capacità di sorveglianza e di armonizzare a livello euro-

peo i livelli di sicurezza delle varie attività nucleari sottoposte al loro controllo.

Nel 1999, con l'aggiunta della Svizzera, hanno formato un gruppo di lavoro chiamato Reactor Harmonization Working Group (RHWG). Nel 2000 hanno pubblicato la guida *Nuclear Safety in EU Candidate Countries* e organizzato il Convegno di un "Harmonization Group on the Safety of Radioactive Waste Management" che si è esteso, nel 2003, in Working Group on Waste and Decommissioning (WGWD).

Nel marzo 2003 WENRA si è accresciuta con i rappresentanti di altri sette Stati (Bulgaria, Repubblica Ceca, Ungheria, Lituania, Romania, Slovacchia e Slovenia) producendo nel 2006 il Rapporto: "Harmonization of Reactor Safety in WENRA Countries".

Nel 2010 WENRA ha organizzato un Convegno del Working Group for Benchmarking and Harmonization of Inspection Practices (WIG) ed elaborato l'importante documento "Safety Objectives for New Nuclear Power Plants".

10. La centrale di Fukushima

Figura 3

Il gravissimo incidente nella centrale nucleare di Fukushima–Daiiki del marzo 2011 ha indotto nell'Unione Europea, come nel resto del mondo, una revisione della sicurezza di tutti gli impianti nucleari in funzione. Il Commissario UE all'energia Oettinger aveva fissato il primo giugno 2011 come data di inizio per una serie di *stress tests* sui 143 reattori nucleari europei.

Tali verifiche in estrema sintesi hanno consistito in un riesame, effettuato dagli operatori stessi controllati dalle rispettive autorità di sicurezza, delle caratteristiche di progetto dei loro impianti ed il loro lavoro è stato sottoposto a ulteriori valutazioni internazionali con ispezioni di controllori nucleari dei Paesi confinanti. Questo è avvenuto per i Paesi UE e, sulla base di specifiche intese bilaterali, anche per Svizzera, Ucraina e Armenia.

La logica della verifica degli *stress tests* è quella della cosiddetta difesa in profondità: eventi iniziatori, perdita di dispositivi di sicurezza, gestione di gravi incidenti. Si procede con un approccio deterministico, perché nelle catene incidentali sistemi di sicurezza non hanno funzionato creando situazioni gravi, se si considerano gli incidenti peggiori, quali la perdita dell'energia elettrica esterna per la centrale (Station Black Out, SBO), la perdita di refrigerante del reattore (*Loss of Coolant Accident*, LOCA), la perdita del pompaggio del refrigerante (*Loss of Flowrate Accident*, LOFA), la perdita del controllo del reattore e quindi l'impossibilità di spegnerlo inserendo le barre di controllo nel suo nocciolo (*Anticipated Transients Without Scram*, ATWS).

Gli eventi incidentali iniziatori sono il terremoto e l'allagamento, come pure condizioni metereologiche estreme, la perdita del pozzo termico (mare, fiume, lago) ove scaricare il calore residuo di decadimento radioattivo del reattore spento (*Ultimate Heat Sink*, UHS) e, nei casi più gravi, la contemporaneità di questi eventi (SBO + UHS).

Gli *stress tests* devono verificare la capacità dell'impianto nucleare di fronteggiare questi eventi con mezzi alternativi supplementari ed infine accertare come il reattore possa garantire la tenuta del suo edificio esterno contenitore affinchè i radionuclidi che si dovessero liberare nel suo interno in seguito all'incidente non fuoriescano in maniera eccessiva contaminando l'ambiente esterno.

Altri eventi iniziatori gravi potrebbero essere incendi di complessi forestali che circondassero l'impianto o la caduta su di esso di aeroplani con carburante (11 settembre 2001). Il gestore dell'impianto deve

specificare i mezzi che ha a disposizione per mantenere le tre funzioni fondamentali della sicurezza (controllo della reattività, refrigerazione del nocciolo, confinamento della radioattività) e le necessarie funzioni di supporto, comprensive di mezzi mobili esterni e di aiuti reciproci nel caso di centrali con più reattori.

Il lavoro di accertamento condotto sino ad oggi sugli *stress tests* in Europa ha portato tutte le autorità di sicurezza nucleare (*European Nuclear Safety Regulators' Group*, ENSREG) a dichiarare che non è necessario in Europa fermare alcun impianto.

L'analisi condotta è stata molto utile per migliorare le condizioni di sicurezza degli impianti e per ricercare progressi futuri adottando revisioni periodiche di ogni impianto almeno ogni 10 anni e migliorando nel contempo la capacità di tenuta dei contenitori esterni.

In tali lavori è emerso che in 4 reattori di 2 Paesi gli operatori hanno meno di un'ora di tempo disponibile per ripristinare le funzioni di sicurezza in caso di SBO e/o di UHS.

In 10 reattori non sono ancora state installate le strumentazioni sismiche, mentre in 4 Paesi sono già in funzione ulteriori sistemi di sicurezza totalmente indipendenti da quelli originali ed installati in zone fortificate contro eventi esterni.

Un quinto Paese sta considerando di adottare un simile miglioramento. Tutti i Paesi partecipanti contano ora di migliorare la sicurezza dei loro impianti per prevenire o mitigare le conseguenze di eventi gravi.

I costi di tali miglioramenti sono stati stimati collocarsi nell'intervallo da 30 a 200 ML di Euro per reattore, per un totale europeo che va da 10 a 25 MLd di Euro per gli anni a venire.

Le principali raccomandazioni elaborate richiedono di adottare per la resistenza ai sismi una accelerazione minima di 0.1 g e di tenere conto del terremoto più grave che sarebbe fisicamente potuto accadere negli ultimi diecimila anni, con uno stesso periodo da esaminarsi per l'inondazione peggiore.

Gli operatori dell'impianto per ripristinare le condizioni di sicurezza dovranno avere disponibile, in caso di SBO e/o UHS, di un tempo minimo di 1 ora.

Misure "passive" (senza bisogno di energia elettrica) contro le esplosioni interne (ad es. di idrogeno) in caso di gravi incidenti devono essere pure disponibili, ad es., con ricombinatori passivi auto–catalitici.

Sistemi di rilascio degli edifici contenitori con adeguati filtri devono essere installati in tutti gli edifici–reattore che ancora non ne siano provvisti ed infine una sala di controllo di emergenza dovrebbe essere installata in quelle centrali più vecchie perché, in caso di incendio o allagamento, gli operatori devono fuggire dalla sala di controllo principale e recarsi nella sala di emergenza che ha solo le funzioni di sicurezza essenziali.

11. *Decommissioning* (prospettive internazionali e piano italiano)

Le attività di smantellamento delle vecchie installazioni nucleari e del trattamento e condizionamento dei rifiuti che si producono sono già una realtà industriale con un mercato internazionale crescente. Nel mondo sono stati costruiti e messi in funzione più di 560 reattori nucleari di potenza, di cui 130 permanentemente messi fuori esercizio, insieme a un gran numero di vari impianti di ricerca che si riferiscono all'intero ciclo del combustibile nucleare. Ad oggi soltanto un 10% di tutti gli impianti messi fuori servizio sono stati completamente smantellati e tutti i rimanenti si trovano ad un diverso stadio di smantellamento.

Nell'Unione Europea a 27 si trovano oggi in esercizio 133 reattori, di cui 1/3 raggiungeranno la fine della loro vita operativa entro il 2025.

La Germania ha fermato 8 dei suoi 17 reattori ed ha annunciato di voler chiudere i rimanenti entro il 2022. Altri paesi hanno annunciato di volere avvicinare la chiusura degli impianti più vecchi.

Il *decommissioning* oggi presenta un mercato internazionale crescente con un potenziale di nuove attività che richiedono operatori esperti di complesse tecnologie in un settore innovativo. Fra le attività coinvolte vi sono quelle di:

— decontaminazione e ripulitura con processi fisici, chimici e meccanici per ridurre il livello di contaminazione radiologica;
— tecniche di smantellamento manuali o remotizzate per tagliare grandi componenti attivati e demolire pareti di contenimento;
— tecniche di movimentazione dei rifiuti che si producono nello smantellamento, fra cui i trattamenti per ridurne i volumi, ad

esempio con tecniche di incenerimento, fusione o compattamento;
— metodologie di caratterizzazione radioattiva di tali rifiuti e di protezione radiologica con misuratori di dose e schermaggi per non diffondere contaminazione;
— caratterizzazione e decontaminazione dei siti ed infine tecniche per un sicuro ed efficiente trasporto dei rifiuti radioattivi prodotti.
— In tutti questi ruoli, innovazioni scientifiche e tecnologiche sono essenziali per guadagnarsi quote importanti del crescente mercato che si prospetta a livello europeo e mondiale.

12. La chiusura del ciclo di vita

Oggi l'industria nucleare guarda con sempre maggiore interesse anche al *decommissioning* delle centrali nucleari e delle altre installazioni nucleari.

Ad oggi 140 reattori di potenza sono in *decommissioning* nel mondo e pochi hanno già raggiunto l'obiettivo finale di completa rimozione dell'installazione e dei vincoli radiologici del sito.

13. Il futuro del *decommissioning*

Nei prossimi anni vi sarà un aumento rapido delle centrali che termineranno la loro vita attiva ed entreranno nello stato di *decommissioning*. Oggi vi è un gruppo di centrali che hanno già raggiunto il termine della vita di progetto ed ancora maggiore è il numero che ha circa 30 anni di vita.

In assenza di Plant Life Extension, entro 10–15 anni ci sarà un incremento notevole delle attività di smantellamento.

14. Le prospettive nel *decommissioning*

EHRO–N, European Human Resource Observatory for Nuclear, sulla base dei dati statistici disponibili da Eurostat ha elaborato e distribui-

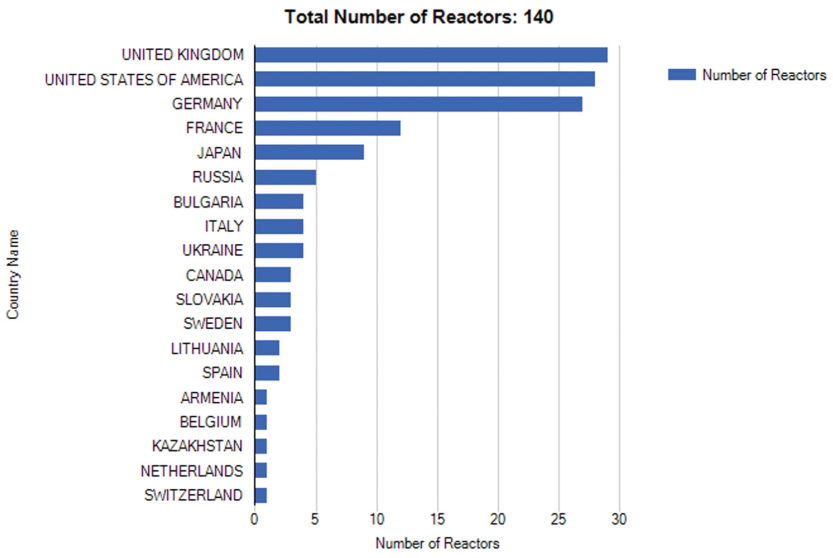

Figura 4. I reattori in *decommissioning* (per Paese)

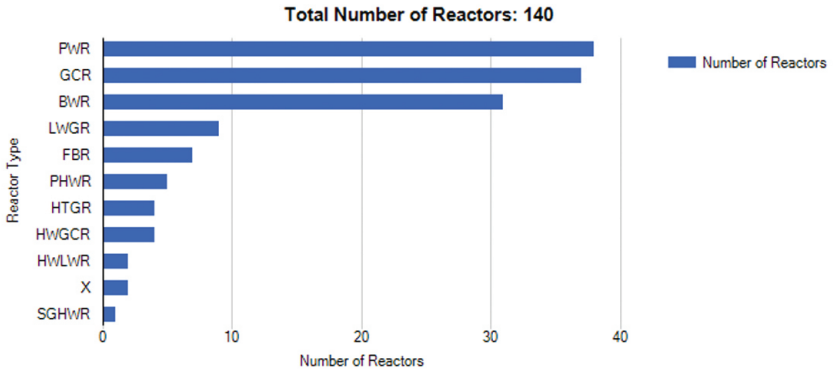

Figura 5. I reattori in *decommissioning* (per tipo di reattore)

to un questionario per individuare i principali profili degli addetti nel settore nucleare per l'Unione Europea a 27. I risultati ottenuti indicano che la richiesta di personale fino al 2020 assomma a queste cifre:

— poco meno di 40.000 esperti nucleari (per nuove posizioni e per rimpiazzare il personale in pensione);

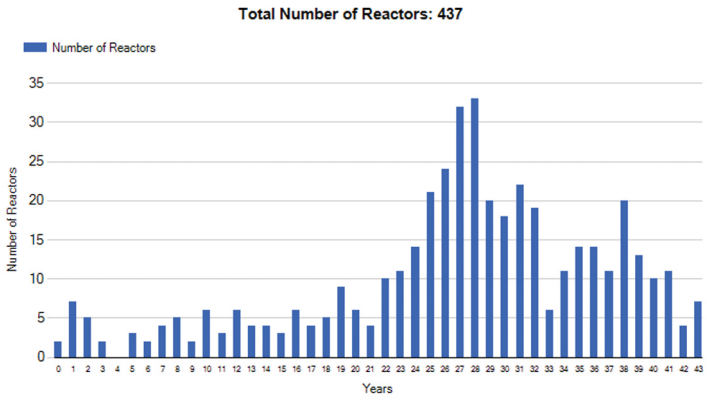

Figura 6. Età dei reattori in esercizio

— circa 35.000 tecnici (per rimpiazzi);
— circa 32.000 ingegneri (non nucleari) e poco meno di altri 25.000 diplomati (sempre per rimpiazzi).

La Commissione Europea ritiene ragionevole che circa il 25% delle esigenze di nuove assunzioni nel campo nucleare siano da assegnare al settore del *decommissioning*. Si aprono quindi possibilità interessanti per i giovani sia in Italia che all'estero.

15. Gli investimenti Sogin

Il budget complessivo previsto da Sogin per il completamento del *decommissioning* di tutti i siti e per la realizzazione del Deposito Nazionale e dello smaltimento dei rifiuti radioattivi di sua competenza è dell'ordine di 7,5 Mld di Euro, così ripartito:

16. Il Deposito Nazionale dei rifiuti radioattivi

La Sogin è stata incaricata dal Governo nel febbraio 2010 di procedere alla localizzazione, progettazione, costruzione ed esercizio del deposito nazionale dei rifiuti radioattivi che comprenderà:

Figura 7. Le prospettive in Italia: i siti nucleari italiani in *decommissioning* a cura di Sogin

— il deposito definitivo dei rifiuti a bassa e media attività;
— il deposito temporaneo dei rifiuti ad alta attività;
— un Parco Tecnologico per lo sviluppo delle tecnologie connesse.

Sarebbe praticamente impossibile, in Italia come altrove, trovare un sito adatto se questo fosse configurato come una discarica di rifiuti pericolosi. Il concetto di Parco Tecnologico può aprire delle prospettive di successo se la popolazione locale è chiamata a partecipare alla scelta con la creazione collegata di centri di eccellenza di protezione radiologica e con l'assunzione di personale locale per sorvegliare la correttezza delle procedure impiegate.

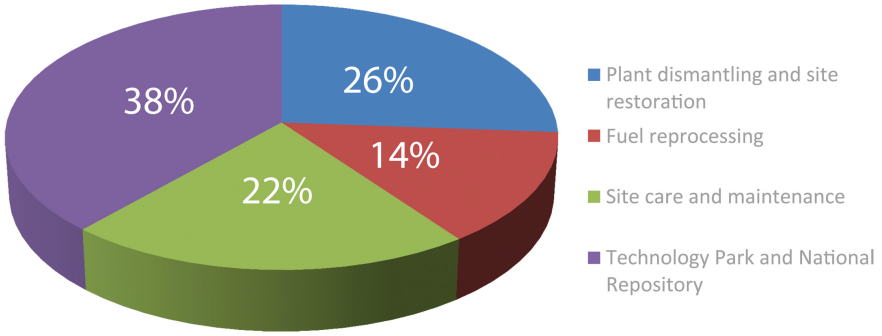

Figura 8

La collaborazione con enti di ricerca, università e operatori industriali, sia nazionali che esteri, permetterà a Sogin di operare in un quadro coordinato ed integrato in grado di produrre sviluppo tecnologico, in modo eccellente e sostenibile.

17. Parco tecnologico e deposito nazionale

Gli investimenti previsti per la localizzazione e la realizzazione sono dell'ordine di 2,5 Mld. di Euro, di cui:

— 0.6 per la progettazione e costruzione del deposito nazionale;
— 1,1 per il parco tecnologico;
— 0,8 per le apposite infrastrutture.

Le figure 9, 10 e 11 illustrano un esempio di deposito superficiale per residui di radioattività bassa e intermedia (LIL) e di lunghissima vita (VLL), centinaia di migliaia di anni.

Figura 9. The Centre de l'Aube for LlL waste

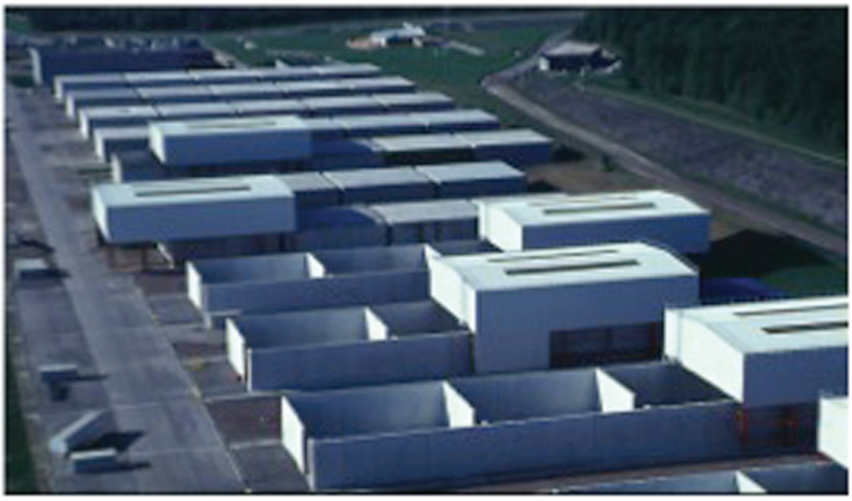

Figura 10. The Centre de l'Aube for LlL waste

Figura 11. VLL Waste: the Morvilliers Disposal

Maurizio Luigi Cumo
uno dei XL
Facoltà di Ingegneria civile e Industriale, Sapienza Università di Roma
maurizio.cumo@uniroma1.it