



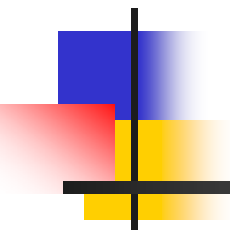
Da un articolo di E. Severini sulla rivista  
"Elettrotecnica" dell'aprile 1941.

---

"... comunque, se anche l'energia di disintegrazione non può ancora mettersi in diretta concorrenza con l'energia di combustione, e se anche non se potrà disporre tanto presto, non è lecito agli ingegneri scartare senz'altro l'eventualità che un giorno essi abbiano a doversi occupare di quelli che saranno vere e proprie *centrali* per lo sfruttamento dell'energia nucleare".

Pila di Fermi: 2 dicembre 1942

Evoluzione della tecnologia dei reattori nucleari negli ultimi cinquant'anni e nel futuro.  
L'IRIS e le sue prospettive



---

Carlo Lombardi

9 maggio 2007

Università degli studi di Milano



# La conferenza di Ginevra

---

- Il presidente americano Eisenhower, con il famoso discorso *Atoms for peace* all'ONU l'8 dicembre 1953, lancia un messaggio di pace e di invito a sviluppare il nucleare civile per il bene dell'umanità. Ne consegue che:
- nell'autunno del 1955 si svolge la Conferenza di Ginevra con migliaia di partecipanti, nella quale il know how nucleare viene "declassificato". È l'inizio del nucleare civile.



# I primi cinquant'anni

---

- **Periodo assai lungo ma pochi cambiamenti sostanziali, a causa:**
  - dimensioni degli impianti
  - stringenti imposizioni della sicurezza
  - lunghezza, onerosità e rischi insuccesso della R&S hanno ridotto alternative, limitato i cambiamenti, preferendo le scelte iniziali, ben studiate e sperimentate, rispetto ad altre potenzialmente migliori, ma meno note.



# Tipi di reattore

---

- Tanti iniziali, con le più svariate combinazioni.
- Vincenti BWR e PWR, con crescita degli ultimi (disp. U arr.; PWR navali).
- Quelli a Grafite ora abbandonati, prospettive HTGR.
- Nicchia per D<sub>2</sub>O, grandi prototipi Veloci.



# Combustibile

---

- Solo pastiglie ossido uranio in tubi metallici (Zr, Inox), poi in fasci di barre.
- Gravità cemento impedisce alternative a questa valida.
- Ciclo Combustibile:
  - in nocciolo uso veleni distribuiti;
  - a valle: *ritrattamento o non.*



# Rifiuti e smantellamento

---

- **Rifiuti ad alta attività:** situazione fluida, nonostante i grandi programmi R&S:
  - Finlandia, Svezia, USA stanno costruendo i depositi geologici,
  - Altri aspettano per migliorare la tecnica o per ridurre le quantità (bruciamento).
- **Smantellamento impianti:** importanza tecnica, economica e organizzativa; in corso attività rilevanti. Attività con ritorni economici.



# Economia di scala

---

- Applicazione estensiva dell'economia di scala, per i suoi supposti **vantaggi** in questo sistema ad alto costo capitale e perché *facile* nei reattori ad acqua.
- In pratica **meno** conveniente, per il manifestarsi di controindicazioni.





# Sicurezza

---

- **Aumento della sicurezza:** non tanto nell'approccio filosofico, quanto nel **miglioramento qualità e sistema protezione sempre più complesso.**
- **Filosofia di sicurezza:** affiancato approccio **probabilistico** a quello **deterministico** per avere una migliore gerarchia degli incidenti.
- **Autorità di sicurezza:** aumento **severità ed interventismo** per malfunzionamenti o incidenti, per pressioni pubblico, per rapida applicazione dell'economia di scala.



# Aspetti politici

---

- **Rapporti con il pubblico:** aspetto cruciale con crescente attenzione, senza procedura vincente, anche in Francia e Giappone.
- **Proliferazione:** preoccupazione crescente dal 1977, quando USA aumenta sensibilità. Fattore **Geopolitico** in sistema già complesso, la cui rilevanza ed influenza sullo sviluppo del nucleare certamente assai importanti. Avvenimenti del passato di **stasi** del nucleare vanno rilette anche sotto questo aspetto.



# Civile-Militare: un vantaggio?

---

- Inizialmente conoscenze, infrastrutture, fabbriche di **enorme rilevanza** dal militare al civile; ma
- Partenza a **gradino** del civile, con scelte tecniche obbligate;
- Ora limiti vincolanti per proliferazione.

Forse non è stato un vantaggio



# Industria

---

- **Industria:** stasi del nucleare negli ultimi decenni provoca riduzione industrie fornitrici. Grande aumento delle attività di *service* per le centrali esistenti, business assai redditizio.
- **Qualità:** applicazione sistematica procedure **Accertamento della Qualità** per migliorare qualità prodotto, procedure operative e organizzazioni. Difficile evitare eccessivo **burocratismo**.



# Incidenti

---

- TMI nel 1979 e di Chernobyl nel 1986.

Il primo ha fornito importanti insegnamenti, meno il secondo. In ambedue:

- importanza **contenitore**,
- non gravità  **fusione** del combustibile,
- necessità qualificazione **operatori**
- interfaccia **uomo-macchina**
- diffusione** informazioni di altri impianti.

Chernobyl con ripercussioni diverse da Paese a Paese, gravi nel nostro, forse per strumentalizzazioni.



# Esperienza funzionamento

---

- **Fattore di carico:** primi valori non soddisfacenti. **Netto** miglioramento ultimo decennio. **Aumento** energia a pari potenza.
- **Durata dell'impianto:** vantaggio economico e possibilità di aumento al di là dei **25-30 anni**: cospicui aumenti autorizzati.
- **Tempi di costruzione:** problema intricato, per valori assai diversi nel tempo e nei vari Paesi. Maggior elemento di *rischio*.



# Education e Ricerca e Sviluppo

---

- **Education:** preoccupazioni per calo studenti e diminuzione esperti. Nel **nostro** Paese le infrastrutture universitarie ancora **ci sono**.
- **Ricerca e Sviluppo:** grande importanza, con **socializzazione** dei costi. Inizialmente, termoidraulica, materiali, neutronica, poi problemi sicurezza, anche con grandi impianti. Sforzo enorme, che ha migliorato le conoscenze anche in altri campi. Da alcuni anni sforzo **attenuato**.



# Il futuro

---

- **Reattori nucleari:** scelte non dall'industria, ma dalla *scienza*. Definire requisiti e valutare *oggettivamente e quantitativamente* i sistemi proposti (sia Generation IV sia INPRO). Tra i requisiti, oltre a quelli ovvi di **sicurezza ed economicità**, **minimizzazione** dei rifiuti, **l'utilizzo** ottimale delle risorse, **la non proliferazione e la protezione** contro attacchi terroristici. Sviluppo con collaborazioni **internazionali**. Non solo elettricità, ma **calore**, **dissalazione**, produzione di **idrogeno**.





# Reattori innovativi e evolutivi

---

- **Reattori innovativi:** cosiddetti di **Generation IV**, per soddisfare requisiti imposti, ma dipende dai risultati della **ricerca**. Sei i concetti, alcuni troppo innovativi. Costi sviluppo elevati: **2-3 miliardi di dollari**, soprattutto se si adotta nuovo combustibile.
- **Reattori evolutivi:** molte proposte con cambiamento del processo, ma non della tecnologia (**Generation III+**): **migliori** degli attuali e realizzabili **prima** di quelli innovativi.

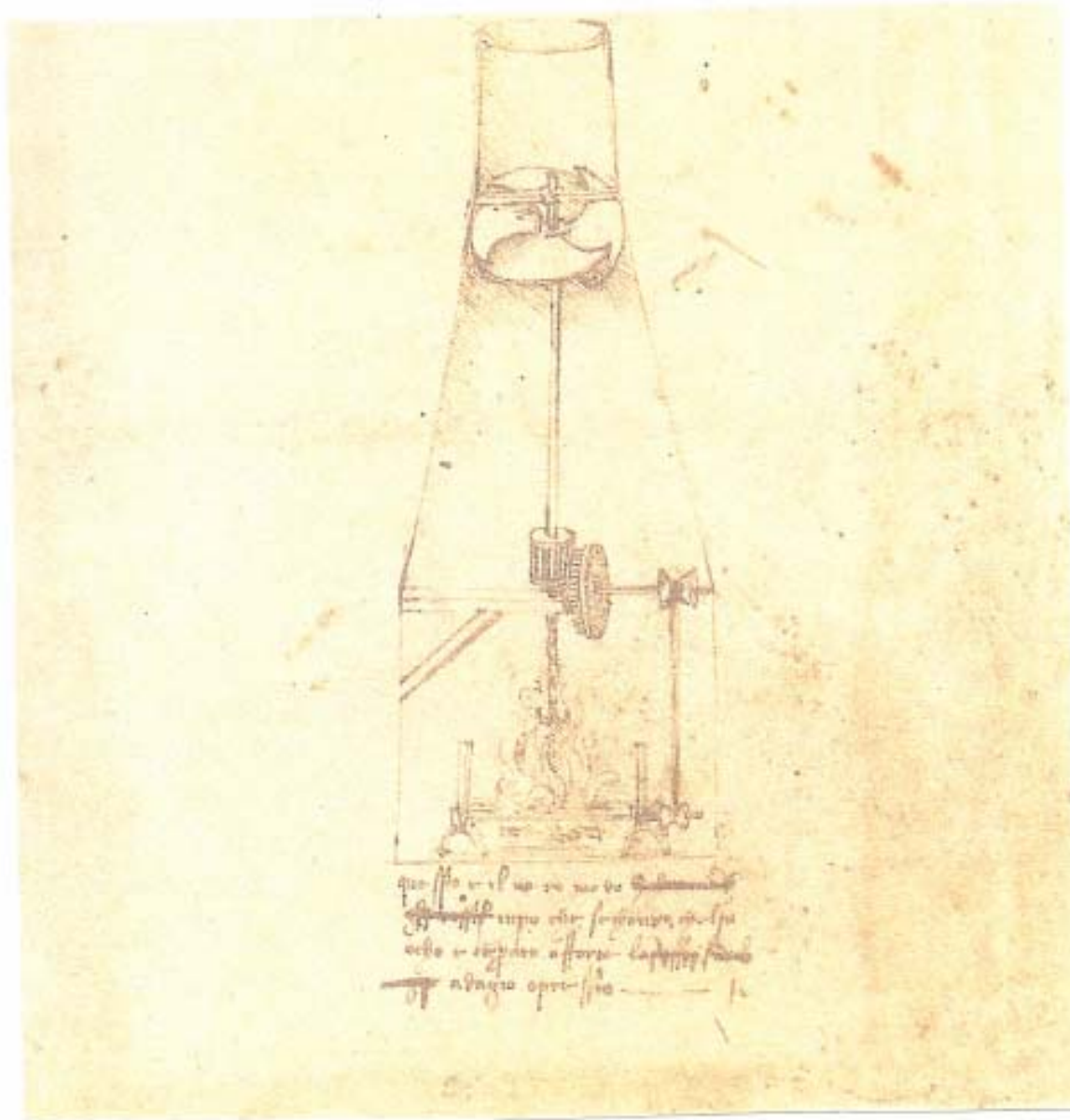


# Sicurezza

---

## Filosofia di sicurezza:

- evitare o comunque fronteggiare la **fusione del combustibile**;
- evitare **piano di emergenza**, scarsamente efficace e difficile da gestire;
- + protezione contro **attacchi terroristici (?)**.
- + automazione nell'intervento protettivo, sistemi protezione **passivi** e sicurezza **intrinseca**, che rimane sempre parziale.



Questo è il vero modo di cuocere gli arrosti, imperò che secondo che 'l fuoco è temperato o forte, l'arrosto si svolge adagio o presto.

*Leonardo*



# Ciclo combustibile e rifiuti

---

- **Ciclo del combustibile:** ridurre consumi uranio, utilizzare anche plutonio, ridurre rifiuti, la vita media e carico termico. Reattori veloci nel lungo periodo. Per la non proliferazione, proposte non completamente risolutive.
- **Rifiuti ad alta attività:** anche bruciarli in reattore (veloce) o in un sistema sottocritico.
- **Smantellamento:** attenzione nel progetto reattore, per facilitare l'operazione a fine vita.



# Tipologie reattori

---

- **Reattori veloci:** indispensabili, ma non quelli attuali. *Fertilizzatori*, ma anche *Bruciatori*. Come farli?
- **Economia di scala:** non più scelta *obbligata*: anche taglie medie-piccole.
- **Reattori modulari:** taglia *media-piccola*; possono contrastare l'economia di scala perché: standardizzabili, fabbricabili in officina, seguono le richieste di mercato, minore l'esborso e il *termine di sorgente*.



# Sicurezza

---

- **Autorizzazioni:** conglobarle in **pochi stadi**, prima di iniziare le costose operazioni realizzative.

A livello europeo effettuare **unificazione criteri di sicurezza**, diversi da Paese a Paese ed in prospettiva avere un'**unica Autorità di Sicurezza Europea**. Al riguardo si stanno già muovendo i primi passi.



# Costi Nucleare

---

- Studi recenti per l'Europa danno per il nucleare **25-35 €/MWh**.
- Confermati dalla Finlandia (ordine centrale).  
Però contano soprattutto i vantaggi strategici:
  - **insensibilità** prezzi materie prime,
  - **vita operativa** maggiore,
  - **bilancia pagamenti** meno negativa,
  - Ma principalmente **esternalità** ambient. che diventano **internalità**, (Kyoto).



# Problemi

---

- Tecnologie **promettenti dei reattori innovativi**, ma con **rischi insuccesso**.
- Scuole di pensiero **contrapposte** per ciclo combust.
- In Europa anche Paesi **contrari** al nucleare, **obsolescenza** infrastrutture sperimentali, **carenza** personale esperto, **scarsa** volontà di ripartire con **decisione** (non solo in Italia).
- La **proliferazione** non facilmente contrastabile con misure **tecniche**, ma anche provvedimenti organizzativi e **politici**.





# Quindi

---

- Guardare con più attenzione il **breve-medio periodo**.
- Non fare salti tecnologici **azzardati**, evitando **fughe** in avanti.
- Dedicare maggiore attenzione ai **reattori evolutivi**, preferendo quelli ad **acqua**.
- Per i reattori di **Generation IV** privilegiare i reattori **veloci** e quelli da sviluppare in tempi **contenuti** e con costi **promettenti**.



# Cosa dovrebbe fare l'Italia

---

- Ha ancora le competenze e le strutture: CIRTEN (consorzio 6 Univ.), ENEA, SIET, SOGIN, CESI, Industrie come Ansaldo e Ansaldo-Camozzi, ma non solo.
- Proseguire su IRIS e veloce al “piombo” e ciclo combust. finanziando programmi concordati internazionalmente.

# Nuclear News

A PUBLICATION OF THE AMERICAN NUCLEAR SOCIETY

## IRIS

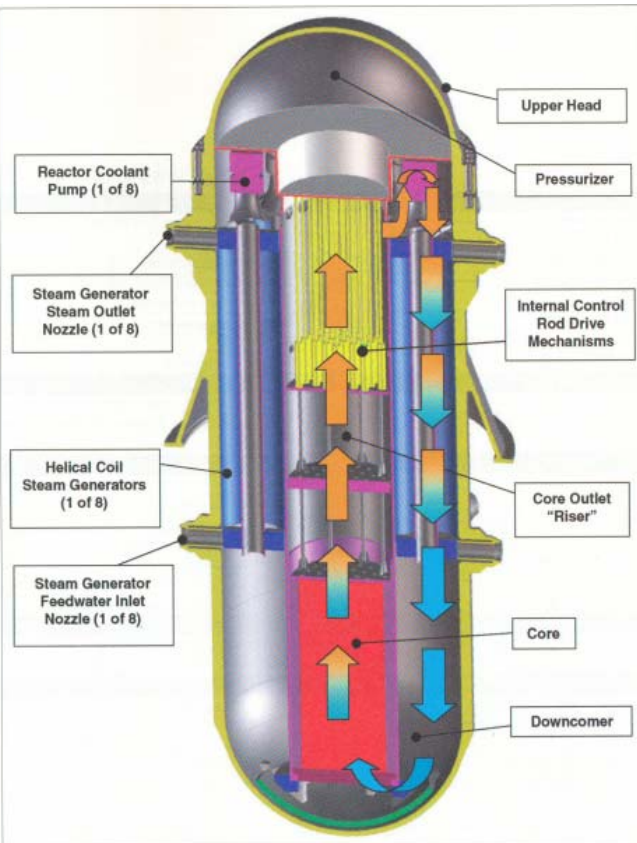
A global approach to nuclear power renaissance

p. 32



Also in this issue

The Nuclear News Interview:  
John Gutteridge ..... p.22  
Citizen advocacy for nuclear energy:  
A road less traveled ..... p.28





## The Global Nuclear Energy Partnership (GNEP)

### GNEP Element: Demonstrate Small-Scale Reactors

**G**NEP will provide small-scale reactors suitable for emerging economies that currently depend on oil and other fossil fuels for growing energy demands. Addressing this market is essential to safely expanding nuclear energy in developing nations and small-grid markets without increasing proliferation concerns.

#### **Small, More Proliferation-Resistant Power Reactors**

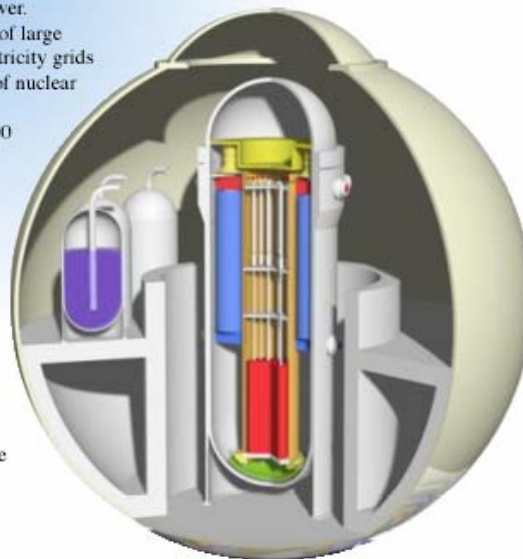
Light water reactors (LWRs) dominate the commercial use of nuclear power. Historically, the requirements of large national markets with big electricity grids have driven the development of nuclear power reactors, resulting in commercial units of about 1000 MWe. Markets with much smaller grids and less well-developed technical infrastructures have not had much impact on power reactor designs and technologies. A different reactor design approach, tailored for this market segment, could help meet the rising power demands associated with economic growth and urbanization, while

avoiding the use of fossil fuels that would otherwise be burned in power plants.

In order to expand the use of nuclear energy in these small electricity markets, a small

*Continued next page*

*An example of a "small reactor" is IRIS, International Reactor Innovative and Secure ([www.irisreactor.org](http://www.irisreactor.org))*



United States  
Department of Energy

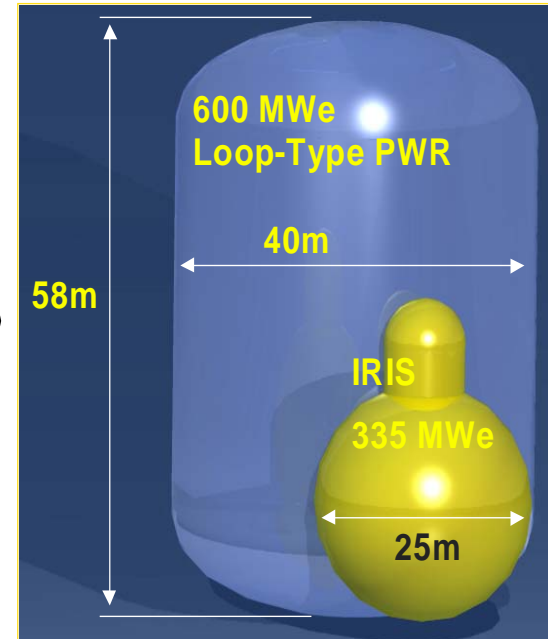
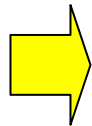
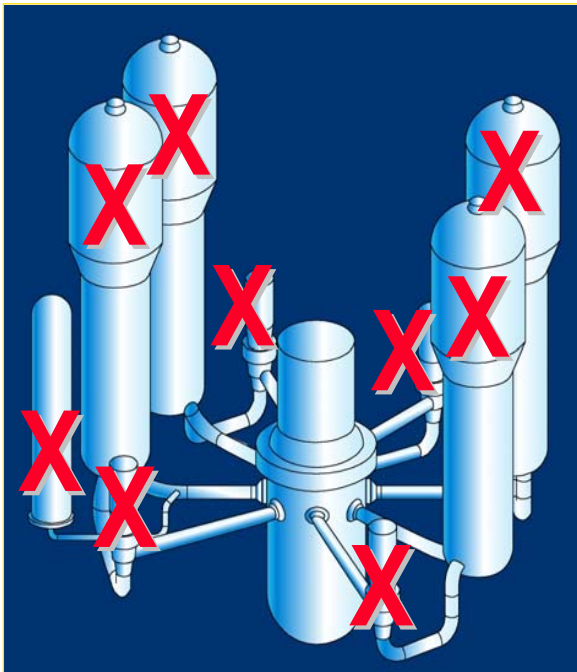


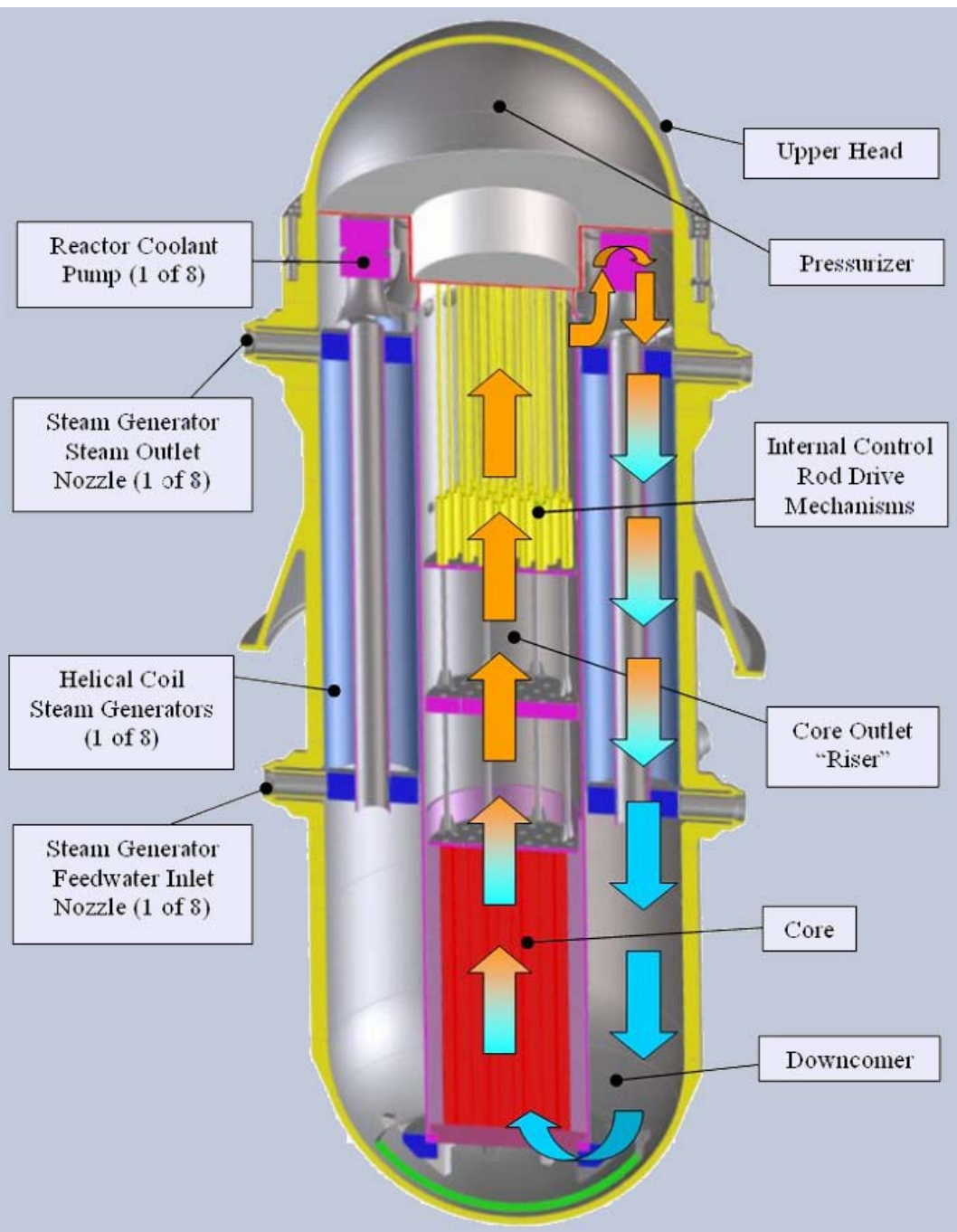


# Consorzio IRIS

| <b>INDUSTRY</b>                                   |                  |                                                                     |
|---------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>Westinghouse</b>                               | <i>USA</i>       | Overall coordination, core design, licensing                        |
| <b>BNFL</b>                                       | <i>UK</i>        | Fuel and fuel cycle                                                 |
| <b>Ansaldo Energia</b>                            | <i>Italy</i>     | Steam generators design                                             |
| <b>Ansaldo Camozzi</b>                            | <i>Italy</i>     | Steam generators fabrication                                        |
| <b>ENSA</b>                                       | <i>Spain</i>     | Pressure vessel and internals                                       |
| <b>NUCLEP</b>                                     | <i>Brazil</i>    | Containment, pressurizer                                            |
| <b>Bechtel</b>                                    | <i>USA</i>       | BOP, AE                                                             |
| <b>OKBM</b>                                       | <i>Russia</i>    | Testing, desalination and district heating co-gen                   |
| <b>LABORATORIES</b>                               |                  |                                                                     |
| <b>ORNL</b>                                       | <i>USA</i>       | I&C, PRA, core analyses, shielding, pressurizer                     |
| <b>CNEN</b>                                       | <i>Brazil</i>    | Transient and safety analyses, pressurizer, desalination            |
| <b>ININ</b>                                       | <i>Mexico</i>    | PRA, neutronics support                                             |
| <b>LEI</b>                                        | <i>Lithuania</i> | Safety analyses, PRA, district heating co-gen                       |
| <b>ENEA</b>                                       | <i>Italy</i>     | Global safety tests, seismic design                                 |
| <b>UNIVERSITIES</b>                               |                  |                                                                     |
| <b>Polytechnic of Milan</b>                       | <i>Italy</i>     | Safety analyses, shielding, T-H, SG design, advanced control system |
| <b>MIT</b>                                        | <i>USA</i>       | Advanced cores, maintenance                                         |
| <b>Tokyo Inst. of Technology</b>                  | <i>Japan</i>     | Advanced cores, PRA                                                 |
| <b>University of Zagreb</b>                       | <i>Croatia</i>   | Neutronics, safety analyses                                         |
| <b>University of Pisa</b>                         | <i>Italy</i>     | Containment analyses                                                |
| <b>Polytechnic of Turin</b>                       | <i>Italy</i>     | Human factors, reliability availability maintainability support     |
| <b>University of Rome</b>                         | <i>Italy</i>     | Radwaste system, occupational doses                                 |
| <b>POWER PRODUCERS</b>                            |                  |                                                                     |
| <b>TVA</b>                                        | <i>USA</i>       | Maintenance, utility prospective                                    |
| <b>Eletronuclear</b>                              | <i>Brazil</i>    | Developing country utility perspective                              |
| <b>ASSOCIATED US UNIVERSITIES (NERI PROGRAMS)</b> |                  |                                                                     |
| <b>Univ. California Berkeley</b>                  | <i>USA</i>       | Neutronics, advanced cores                                          |
| <b>Univ. of Tennessee</b>                         | <i>USA</i>       | Modularization, I&C                                                 |
| <b>Ohio State</b>                                 | <i>USA</i>       | In-core power monitor, advanced diagnostics                         |
| <b>Iowa State (&amp; Ames Lab)</b>                | <i>USA</i>       | On-line monitoring                                                  |
| <b>Univ. of Michigan (&amp; Sandia Labs)</b>      | <i>USA</i>       | Monitoring and control                                              |

# Reattore a primario integrato





Tutti i componenti del circuito primario sono all'interno del recipiente a pressione che contiene il nocciolo. Anche il sistema di raffreddamento di emergenza.



# Safety by design (1)

| <b>Caratterist. progetto</b>                 | <b>Implicazioni sicurezz.</b>                                                                                             | <b>Tipi incidente</b>                                       |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Schema integrato                             | Nessun tubo grande                                                                                                        | - LOCAs                                                     |
| Recipiente largo e alto                      | + acqua<br>+ circolazione naturale<br>Barre tutto all'interno                                                             | - LOCAs<br>- Diversi eventi<br>- No espulsione barre        |
| Asportazione calore nel recipiente           | Depressurizza il primario per condensazione e non per perdita di massa.<br>Rimozione calore tramite GV e sistema passivo. | - LOCAs<br>-Eventi che richiedono raffreddamento.<br>- ATWS |
| Piccoli tubazioni+alta pressione contenitore | Ridotta driving force attraverso rottura                                                                                  | - LOCAs                                                     |
| Pompe multiple                               | Minor importanza rottura pompa                                                                                            | - Rotore bloccato, rottura albero.                          |



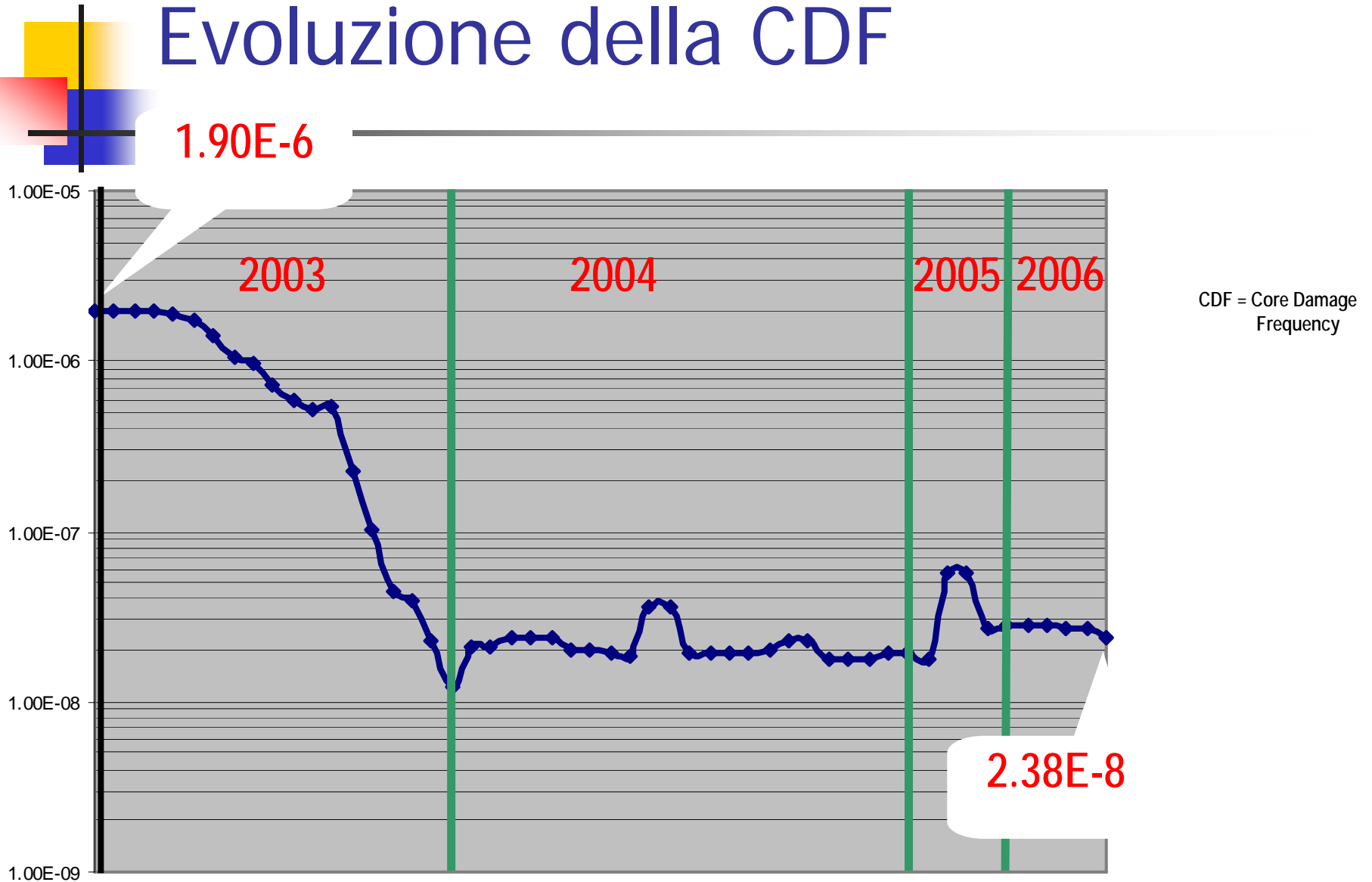


# Safety by design (2)

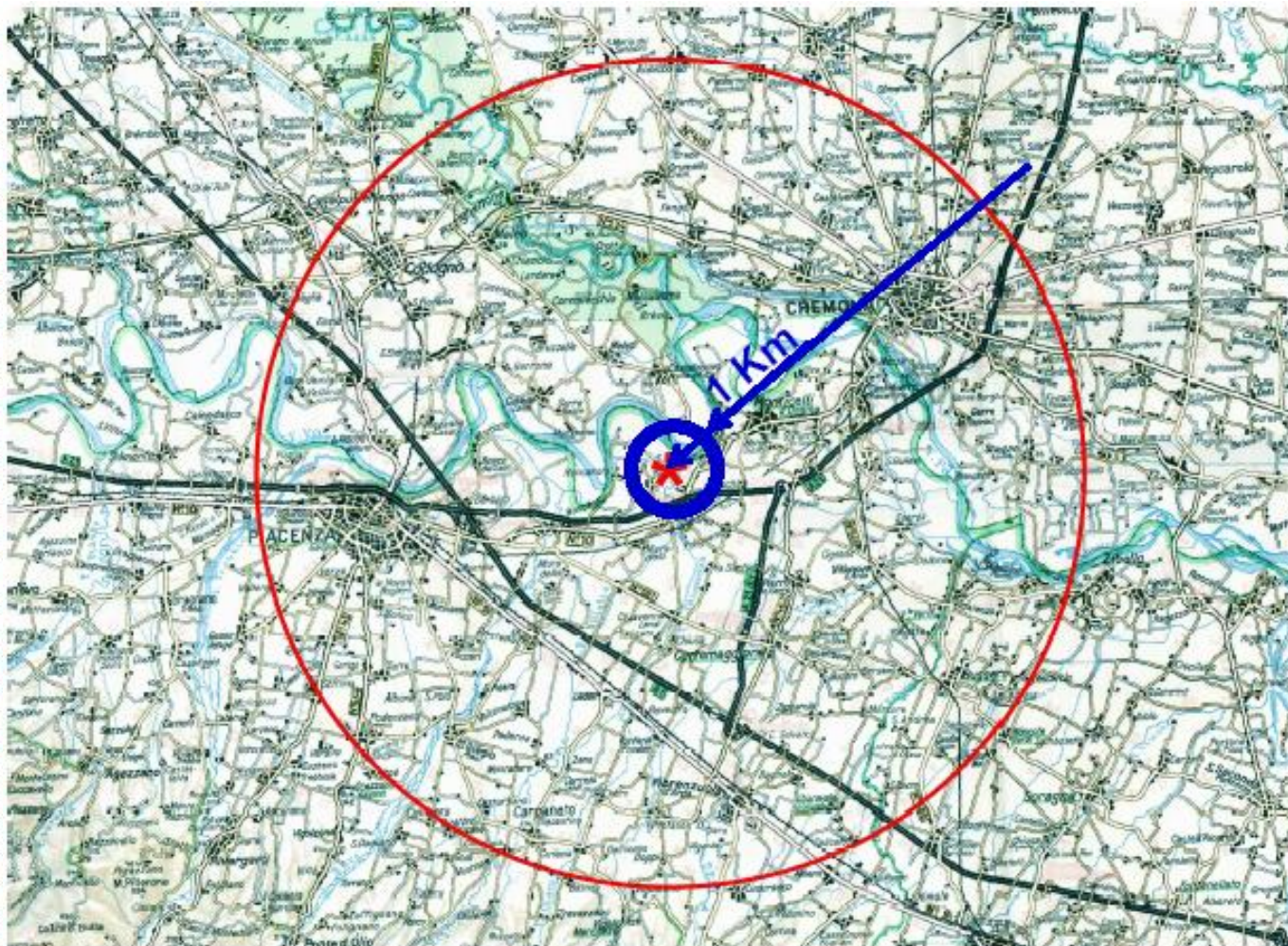
| <b>Caratterist. progetto</b>                             | <b>Implicazioni sicurezz.</b>                                                                                                                                                                                                                   | <b>Tipi incidente</b>                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alta pressione di progetto dei Generatori di Vapore (GV) | <ul style="list-style-type: none"><li>- No valvole sicurez. GV</li><li>- Sistema primario non può pressurizzare quello secondario.</li><li>- Sistema vapore e acqua alimento resistono pressione primario: minor probabilità rottura.</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>- Rottura tubo GV</li><li>- Rottura linea vapore</li><li>- Rottura linea alimen.</li></ul> |
| GV con sola passata                                      | Limitato inventario acqua                                                                                                                                                                                                                       | <ul style="list-style-type: none"><li>- Rottura linea vapore</li><li>- (Rott. linea alimen.)</li></ul>                           |
| Pressurizzatore integrato                                | Alto rapporto volume/potenza                                                                                                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"><li>- Eventi surriscaldam., incluso rottura linea alimento.</li><li>- ATWS</li></ul>           |

# Approccio probabilistico

## Evoluzione della CDF



# Esempio: un IRIS a Caorso





# Conclusioni

---

- IRIS è un reattore molto promettente
- Caratteristiche:
  - *Safety-by-design*<sup>TM</sup>
  - Nessuna nuova tecnologia
  - Bassissima probabilità di fusione nocciolo
  - No evacuazione popolazione
  - Semplicità
  - No materiali attivati fuori recipiente a pressione
  - Facile smantellamento
  - Adatto a paesi sviluppati e in via di sviluppo
  - La taglia media e la modularità consentono di seguire le necessità del mercato e riducono gli esborsi capitale
  - Pronto per il 2012-2015