

# Impianti Nucleari Raffreddati al Metallo Liquido

Tesi a cura di:

- **Matteo Calì**

Relatore:

- **Prof. Ing. Girolamo  
Costanza**

Correlatore:

- **Prof. Ing. Maria Elisa  
Tata**

# Impianti Nucleari di IV Generazione

Sono una tipologia di reattori nucleari a fissione attualmente in fase di studio (si pensa che potranno entrare in commercio tra il 2030 ed il 2040) per superare le tipologie già utilizzate in termini di:

**Generation IV:** Nuclear Energy Systems Deployable no later than 2030 and offering significant advances in sustainability, safety and reliability, and economics

- **Sostenibilità**
- **Sicurezza**
- **Economia**
- **Efficienza Energetica**

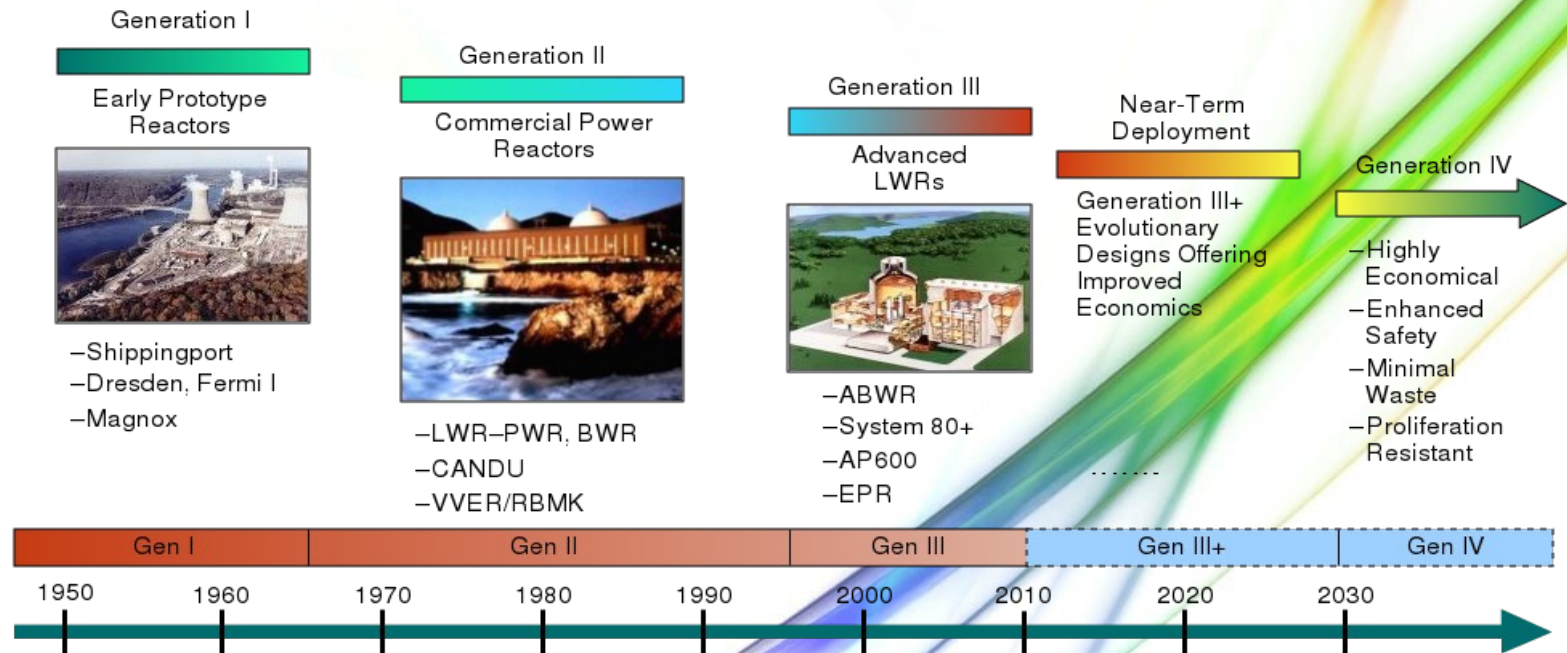


Fig.1 Cronologia delle varie generazioni di reattori nucleari

# Impianti Nucleari di IV Generazione

Sono state avanzate varie proposte adoperanti tipologie di fluidi di raffreddamento del reattore diversi, ognuna con i suoi vantaggi e le sue difficoltà da superare. Esse sono:

- **VHTR** (Very High Temperature Reactor), raffreddato ad He a circa 1000°C
- **MSR** (Molten Salt Reactor), raffreddato con una miscela di Cloruri e Fluoruri liquidi
- **SCWR** (Super Critical Water Reactor), raffreddato con acqua oltre il suo punto critico
- **GFR** (Gas-cooled Fast Reactor), raffreddato con un gas a circa 700-800°C, principalmente CO<sub>2</sub> o He
- **LFR** (Lead-cooled Fast Reactor), raffreddato con Pb o una lega eutettica di Pb-Bi allo stato liquido
- **SFR** (Sodium-cooled Fast Reactor), raffreddato con Sodio allo stato liquido



# Schema di un Reattore Nucleare al Metallo liquido

## Liquid Metal cooled Fast Breeder Reactors (LMFBR)

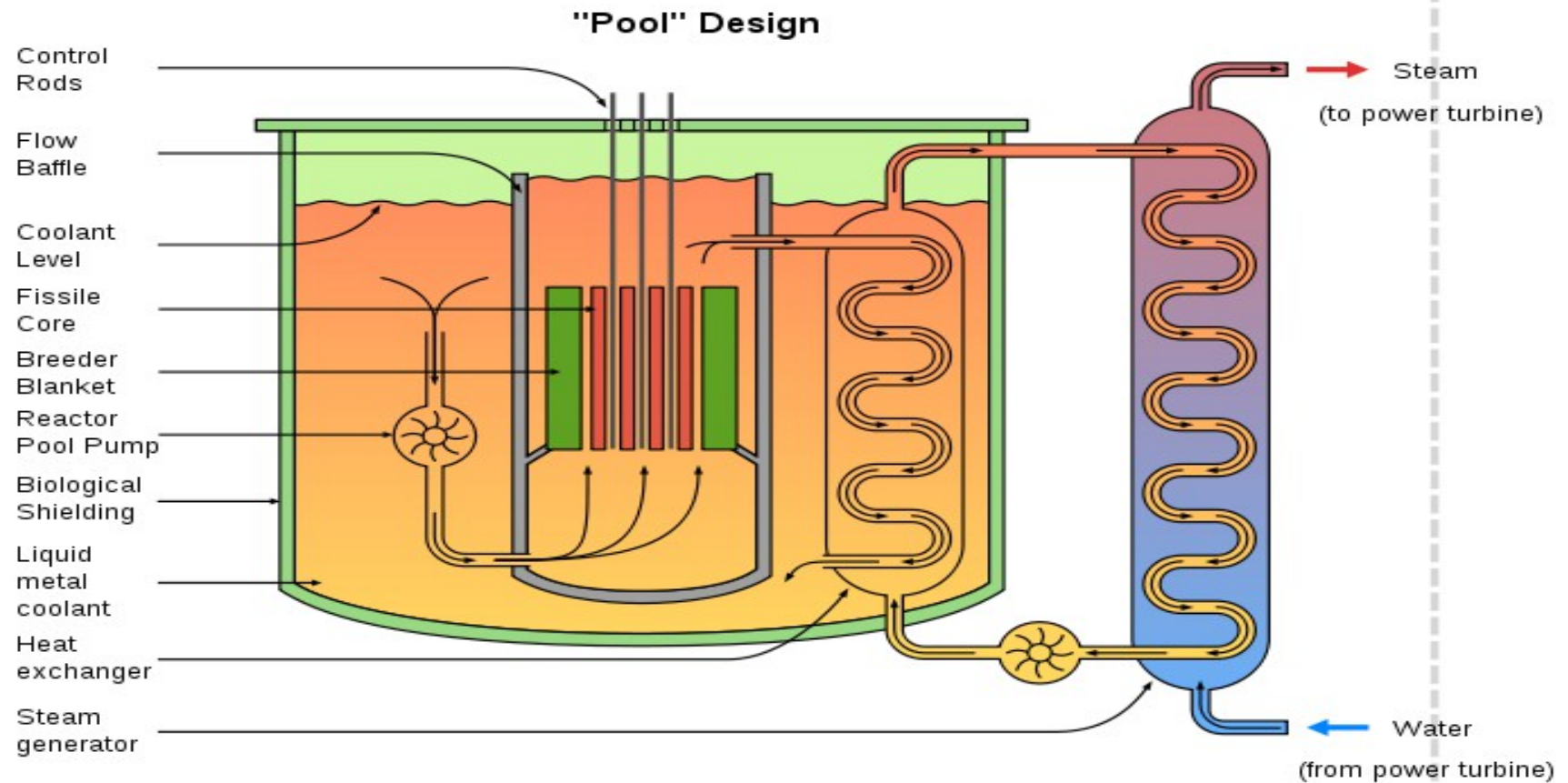


Fig.2, Rappresentazione Schematica di un Reattore Nucleare a Fissione raffreddato con Metallo Liquido

# Impianti Nucleari attualmente in attività

Quasi tutti i reattori nucleari in attività adoperano acqua come fluido refrigerante (**P**ressurized **W**ater **R**eactor, **L**ight **W**ater **G**raphite **R**eactor, **B**oiling **W**ater **R**eactor e **P**ressurized **H**eavy **W**ater **R**eactor).

Vi sono poi alcuni impianti raffreddati a Gas (**G**as **C**ooled **R**eactor ed **A**dvanced **G**as **R**eactor), che contribuiscono per il 3,4%.

Infine esistono due reattori al Metallo Liquido (**F**ast **B**reeder **R**eactor), che possono essere considerati i precursori dei SFR e LFR di IV Generazione

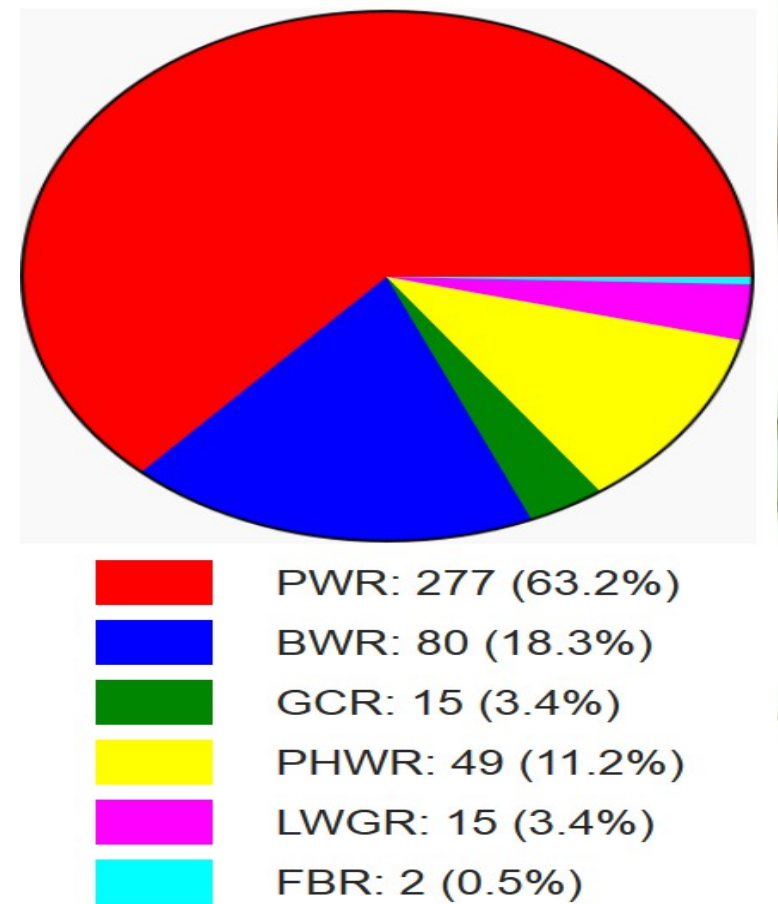


Fig. 3 Tipologie di Reattori nucleari attualmente in attività

# Criticità degli Impianti Nucleari ad Acqua

Gli impianti nucleari ad acqua presentano una serie di criticità che hanno portato nel corso degli anni ad una serie di incidenti di varia entità (tra cui Chernobyl e Fukushima). Esse sono:

- **Bassa conduttività termica**, meno di un centesimo di quella del Sodio (rischio di surriscaldamento in caso di guasto)
- **Bassa temperatura massima** (circa 300°C) del ciclo di conversione dell'energia (basso rendimento termodinamico, intorno al 34%)
- **Bassa temperatura di ebollizione** (necessità di utilizzare un fluido bifase o di pressurizzarlo)
- **Impossibilità di realizzare reattori auto-fertilizzanti** (maggiore fabbisogno di combustibile fissile)



# Impianti Nucleari al Metallo Liquido, Vantaggi

Gli Impianti Nucleari raffreddati al Metallo Liquido permetterebbero di migliorare i seguenti aspetti:

- **Conduttività Termica**
- **Temperatura Massima e Rendimento del Ciclo**
- **Ingombro** a parità di calore asportato
- **Schermatura** dai raggi gamma (l'irraggiamento è inversamente proporzionale alla densità di massa del materiale)
- **Economia Neutronica** (Possibilità di realizzare un reattore auto – fertilizzante)
- **Sicurezza** (Na e Pb si trovano in fase liquida alle temperature di esercizio, mentre solidificano rapidamente a temperatura ambiente)

# Impianti Nucleari al Piombo, tipologie di Refrigeranti

Sebbene le temperature di esercizio si attestino intorno ai  $500^{\circ}\text{C}$ , possono verificarsi eventi che portino ad improvvisi raffreddamenti, che possono portare a premature solidificazioni del Piombo (la cui temperatura di fusione è di  $327^{\circ}\text{C}$ ). Per questa ragione è stato studiato anche l'utilizzo di una lega eutettica di Piombo e Bismuto, il cui punto di fusione si trova a  $125^{\circ}\text{C}$ .

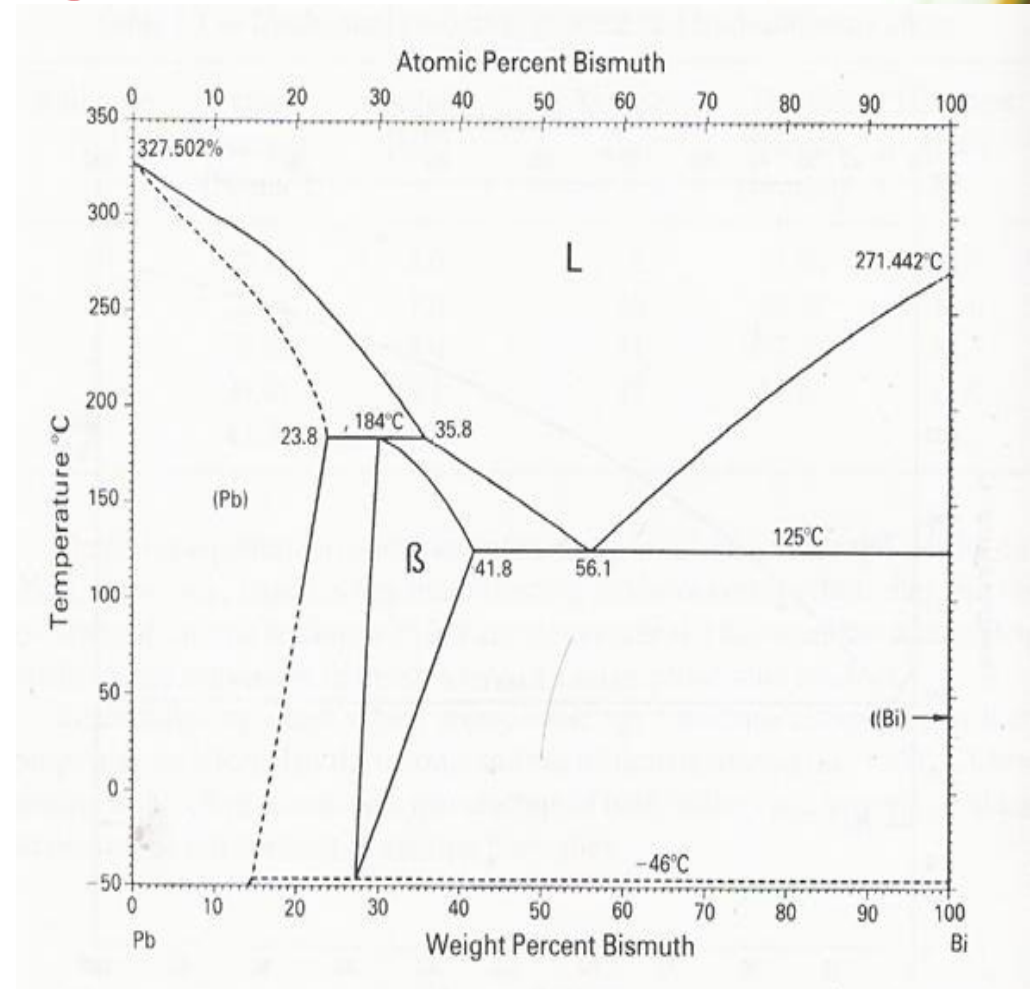


Fig. 4, Diagramma di Fase Piombo - Bismuto



# Impianti Nucleari al Piombo, Criticità

Nonostante i vantaggi precedentemente analizzati, sussistono ancora diverse problematiche che attualmente limitano l'impiego di tale tecnologia, tra cui:

- **Fenomeni di Infiltrazione** di Piombo nei rivestimenti
- **Corrosione** da sfregamento del Piombo contro le pareti
- **Formazione e rilascio di Gas tossici** di Polonio (Leghe Piombo - Bismuto)

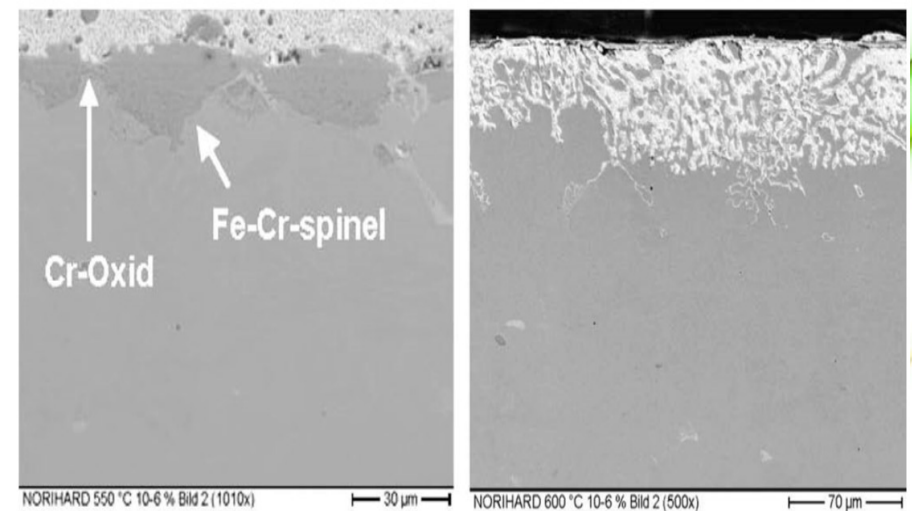


Fig. 5, Analisi Metallografica di un acciaio esposto ad un bagno di Piombo Liquido prima a 550°C e poi a 600°

# Impianti Nucleari al Piombo, Criticità

I meccanismi di sfregamento, uniti all'infragilimento dei rivestimenti dovuto alle infiltrazioni di piombo possono portare nel tempo a notevoli asportazioni di materiale, che pongono un forte limite allo sviluppo di questa tecnologia

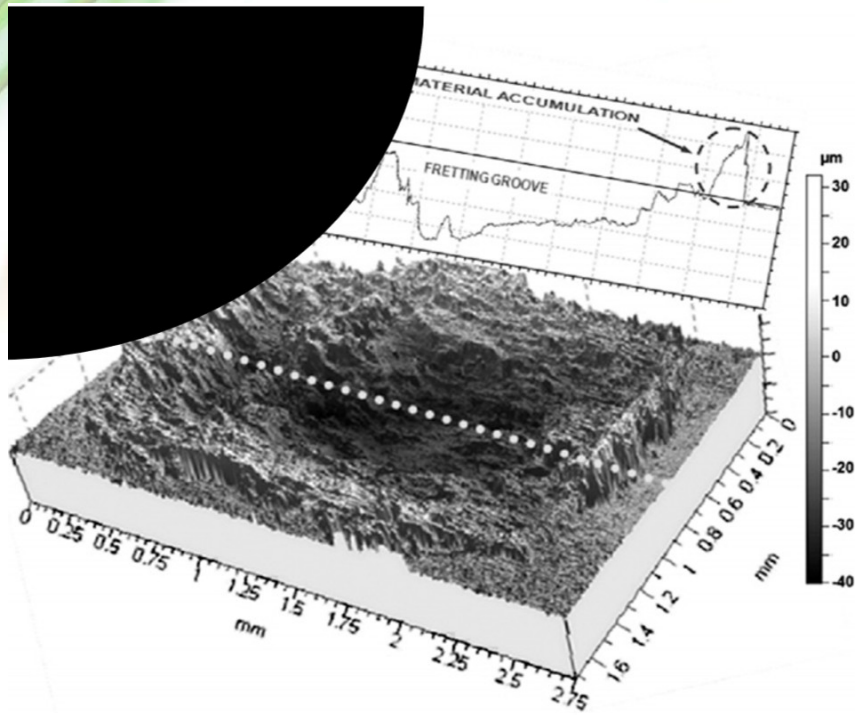


Fig. 6, Profilometria Laser di un campione di acciaio dopo un'esposizione di 150h ad un bagno di Piombo Liquido a 500°C

# Impianti Nucleari al Sodio, Criticità

Sebbene questa soluzione sia già attualmente adoperata ( 2 reattori in attività, 2 in costruzione e 8 dismessi), alcune sue debolezze progettuali ne rendono prematuro l'impiego su larga scala. Tra queste una delle più gravose è l'invecchiamento termico dei rivestimenti, causato dalle alte temperature di esercizio.

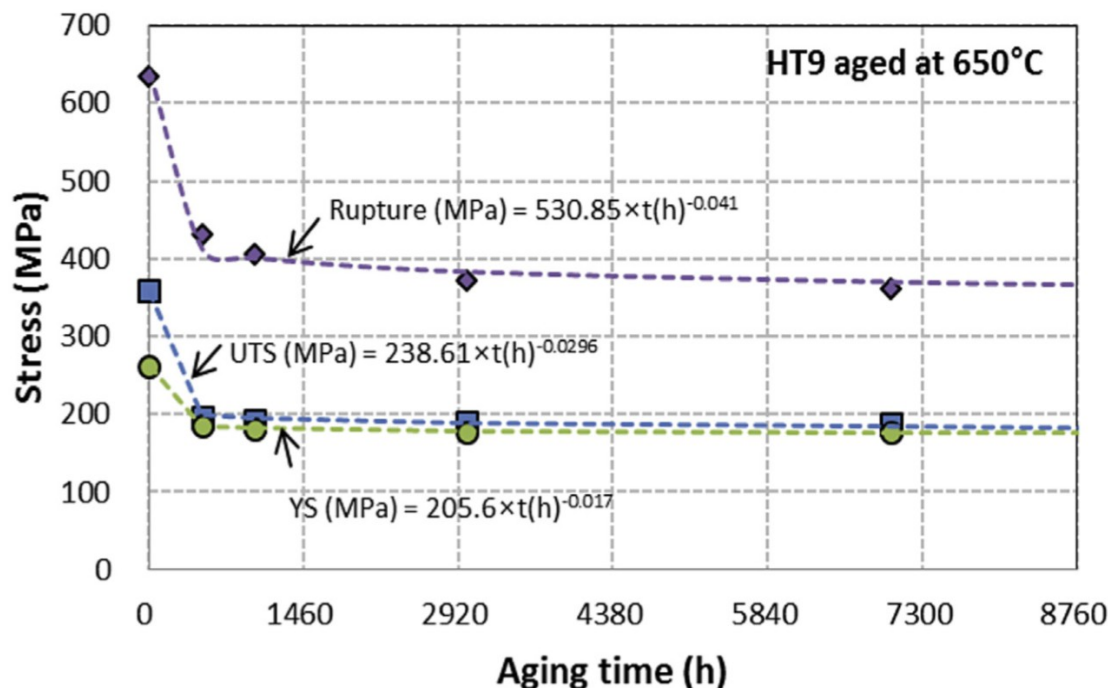


Fig. 7, Andamento nel Tempo dei Carichi di Rottura e Snervamento di un campione d'acciaio esposto ad una temperatura di 650°C



# Impianti Nucleari al Sodio, Criticità

L'ostacolo più grande rimane tuttavia l'estrema reattività del Sodio metallico, che dà luogo a reazioni di combustione talvolta esplosive se esposto anche al minimo contatto di Ossigeno o Acqua

- $2\text{Na(s)} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH(aq)} + \text{H}_2\text{(g)}$
- $2\text{Na(s)} + \text{O}_2\text{(g)} \rightarrow 2\text{Na}_2\text{O}_2\text{(s)}$
- $4\text{Na(s)} + \text{O}_2\text{(g)} \rightarrow 2\text{Na}_2\text{O(s)}$

# Confronto tra Impianti Nucleari ad Acqua, al Sodio e al Piombo

	Impianti ad Acqua (leggera)	Impianti al Sodio	Impianti al Piombo
Punto di Fusione Refrigerante	0°C, 1 atm	97,72°C, 1 atm	327,5°C, 1 atm
Punto di Ebollizione Refrigerante	100°C , 1 atm	882,85°C , 1 atm	1749°C, 1 atm
Conduktività Termica Refrigerante	0,61 W/m*K	77,2 W/m*K	35,2 W/m*K
Temperatura Massima Ciclo	270~290°C	500~520°C	450~470°C
Rendimento Termodinamico	32~34%	42~46%	40~44%
Sezione d'Urto Neutronico (barn)	0,34	0,13	0,03

# Conclusioni

L'utilizzo di Piombo o Sodio liquido come refrigerante offre ottime prospettive di miglioramento agli impianti nucleari, tuttavia vi sono ancora numerosi ostacoli da superare per poter brevettare la prima tecnologia ed adoperare su larga scala la seconda.

	TRL	TRL Function	Generic Definition	Phase
achieved	1	Technology Down-Selection	•Basic principles definition	Screening
	2		•Technology concepts and applications definition	
Ongoing	3	Final Process Selections & integration	•Demonstration of critical function •Proof of concept	Pre-qualification
	4		•Lab-scale component validation	
	5		•Component validation in a relevant environment	Qualification
Further Development	6	Full-scale integrated testing	•System/subsystem model or prototype demonstration in relevant environment	
	7		•System prototype demonstration in prototypic environment	
	8	Full-scale demo	•Actual system completed and qualified through test and demonstration	
	9		•Actual system proven through successful operations	

Fig. 7, Stato della ricerca sui reattori nucleari al Piombo Liquido