



Reattori in esercizio e in costruzione per la produzione di energia elettronucleare Survey internazionale

Presentazione del Quaderno Io Roma
N. 4S/2023 - Commissione Ricerca e Reattori Innovativi
Area Nucleare

***Panoramica dei reattori nucleari di terza generazione a maggior
diffusione commerciale. Criteri di preselezione per lo scenario
italiano (dal paragrafo 4 del Rapporto della Commissione
Ricerca e Reattori Innovativi).***

Ing. Giuseppe Canzone



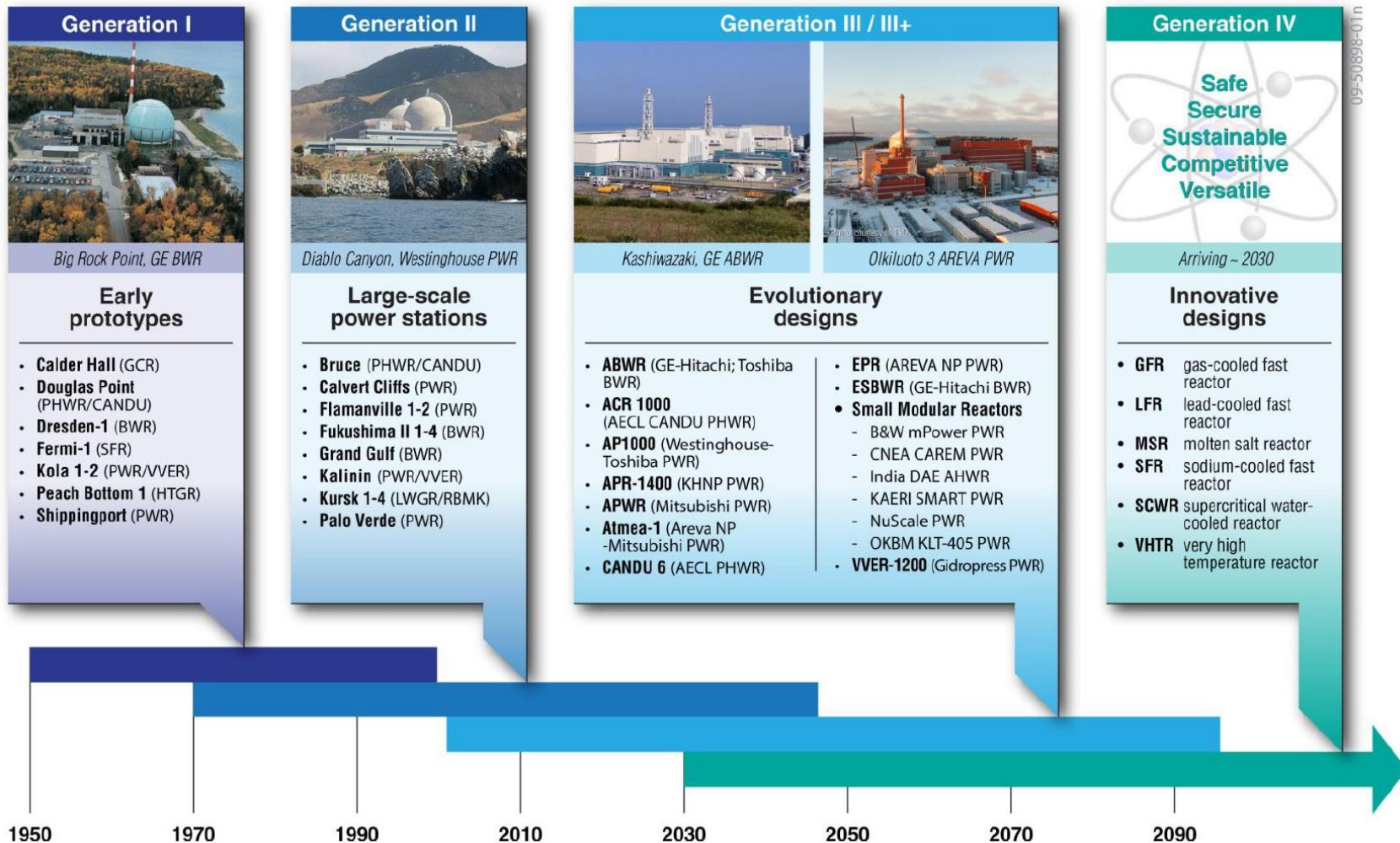
Indice degli argomenti:

- Introduzione: Evoluzione dei reattori nucleari
- Principali caratteristiche dei reattori di IIIGen / IIIGen+
- Il mercato dei reattori di grande taglia
- SMR e reattori avanzati operativi e in costruzione
- Reattori di IIIGen / IIIGen+ in esercizio (11 luglio 2024)
- Reattori di IIIGen / IIIGen+ in costruzione (11 luglio 2024)
- Conclusioni
- Bibliografia e Approfondimenti

Evoluzione dei reattori Nucleari



09-50898-01n



Ing. Giuseppe Canzone

Reattori in esercizio e in costruzione per la produzione di energia elettronucleare - Survey internazionale



Principali caratteristiche dei reattori di III Gen / III Gen+



EPR presso la centrale nucleare di Flamanville (Francia). Photo courtesy EDF Médiathèque



Rendering di una centrale nucleare con 2 unità APR-1400 (Fonte: KHNP)



Fonte: <https://www.westinghousenuclear.com/new-plants/ap1000-pwr>

Caratteristiche salienti dei reattori di terza generazione (miglioramenti rispetto alle generazioni precedenti) :

- Maggiore ricorso alla **standardizzazione nei componenti e del layout di impianto** per accelerare la concessione di licenze, ridurre i costi di capitale e ridurre i tempi di costruzione.
- **Design più semplice e robusto**, orientato alla rapidità di intervento e manutenzione: meno vulnerabili a problemi operativi.
- **Fattori di utilizzo più elevati e vita operativa più lunga**, in genere 60 anni.
- Probabilità di incidenti che comportano la fusione del nocciolo, ulteriormente ridotta e introduzione di nuovi sistemi di mitigazione degli incidenti severi
- In seguito ad arresto veloce l'impianto non necessita di alcun intervento attivo per (tipicamente) 72 ore.
- **Migliore sfruttamento del combustibile** (bruciamento del fissile)
- Edifici di contenimento ulteriormente rinforzati per resistere all'impatto con aeromobili
- caratteristiche di **sicurezza passiva o intrinseca** che non richiedono controlli attivi o interventi da parte dell' operatore in caso di malfunzionamento: i sistemi di sicurezza fanno affidamento sulla gravità, sulla convezione naturale o sulla resistenza alle alte temperature.
- Progettazione ottimizzata per "seguire" il carico: potenzialmente l'unità può variare la sua potenza in uscita dal 25% al 100% in meno di 30 minuti per meglio adattarsi alle richieste della rete (caso dell' EPR di EDF-Framatome)
- Modularità dei componenti e dei sistemi: ampio ricorso al pre-assemblaggio e al test in fabbrica. I moduli (alcuni fino a 1000 t) sono già progettati per facilitarne il trasporto e l'installazione: ciò comporta una riduzione dei tempi di costruzione in sito (caso dell' AP-1000 di Westinghouse).





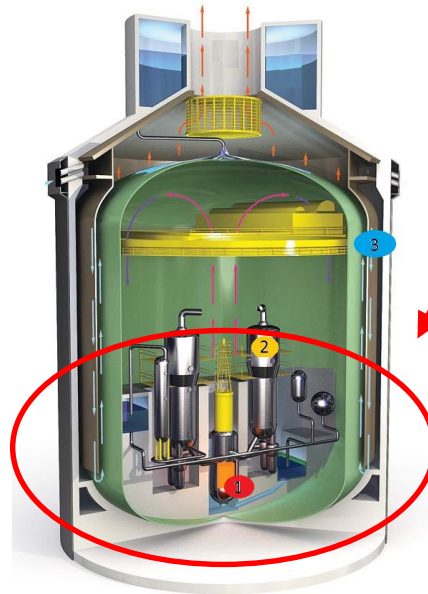
Modularità dei reattori di III Gen / III Gen+



Installazione del modulo CA01 presso il cantiere dell' unità 1 (reattore modello CAP-1000) della nuova centrale nucleare di Lianjiang (Cina).

- ❑ Massa: 1066 tonnellate
- ❑ Ingombro: una lunghezza 27 metri, larghezza 29 metri, altezza 24 metri,
- ❑ Materiale: cemento e acciaio - composto da 47 sotto-moduli pre-assemblati in officina (montaggio finale in cantiere)
- ❑ Funzione: il modulo ospiterà il recipiente a pressione del reattore i generatori di vapore e altri componenti. Viene definito super modulo perché è troppo grande per essere trasportato su strada e su rotaia ed è stato costruito sul posto.
- ❑ Il modulo è stato posizionato il 13 aprile 2024; l'operazione di sollevamento e movimentazione è durata 3h e 18min.

Le differenze del CAP-100 rispetto all' originale AP1000 includono la conformità allo standard di progettazione cinese GB6429, la gestione della costruzione, i requisiti tecnici per la supply chain, le modifiche introdotte in seguito all' incidente di Fukushima e la progettazione dei moduli.



Immagini fonte: SNERDI, <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Super-module-installed-at-first-Lianjiang-unit>

Il mercato dei reattori di grande taglia (1-3)

Progettista		Acqua leggera in pressione PWR	Acqua leggera bollente BWR	Acqua pesante in pressione PHWR
EDF (Framatome) 	State-owned company (2023-present)	Evolutionary Power Reactor (EPR), EPR 2, Atmea 1	KERENA	
Westinghouse Electric Corporation LLC 	Joint Venture: Brookfield Renewable Partners* (51%) (2023-present) e Cameco* (49%) (2023-present) *Public company	Advanced Passive 1000 (AP-1000)		
Hitachi-GE Nuclear Energy  	Joint Venture: Hitachi* e General Electric Company* *Public company		Advanced BWR (ABWR), Economic Simplified BWR (ESBWR)	
KHNP/KEPCO 	Public, State-owned company	Advanced Power Reactor (APR-1400)		
Mitsubishi Heavy Industries 	Public company	Advanced PWR (APWR), Atmea 1		
Rosatom 	State-owned	AES-92 (VVER-1000), AES-2006 (VVER-1200), VVER-TOI		
CNNC / CGN 	State owned	ACP-1000, ACPR-1000, HPR-1000 'Hualong One'		
SNPTC 	State-owned	CAP-1400		
SNC Lavalin (dal 2023 AtkinsRéalis) 	Public company			Enhanced Candu 6 (EC 6)
NPCIL 	Public Sector Undertaking (State-owned 51%)			Indian Pressurized HWR-700 (IPHWR-700)

Ing. Giuseppe Canzone

Reattori in esercizio e in costruzione per la produzione di energia elettronucleare - Survey internazionale

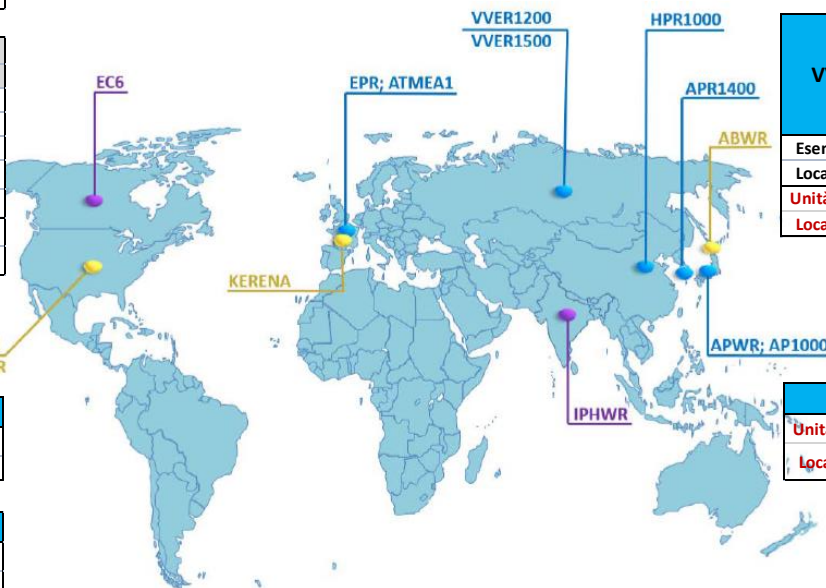
Il mercato dei reattori di grande taglia (2-3)

AP-1000	Tempo di costruzione		
		[giorni]	[anni]
	Min	3038	8,3
	Max	3761	10,3
	Media	3378	9,3
Unità costruite	6	P _{nom} [MW _e]	7200
Localizzazione sito	67%	costa	
Unità in costruzione	1	P _{nom} [MW _e]	1200
Localizzazione sito	0%	entroterra, bacino artificiale	

EPR	Tempo di costruzione		
		[giorni]	[anni]
	Min	3146	8,6
	Max	6057	16,6
	Media	4187	11,5
Unità costruite	3	P _{nom} [MW _e]	4950
Localizzazione sito	100%	costa	
Unità in costruzione	3	P _{nom} [MW _e]	4950
Localizzazione sito	100%	costa	

VVER-1200	Tempo di costruzione		
		[giorni]	[anni]
	Min	2553	7,0
	Max	3844	10,5
	Media	3278	9,0
Esemplari costruiti	6	P _{nom} [MW _e]	7200
Localizzazione sito	33%	costa	
Unità in costruzione	15	P _{nom} [MW _e]	18000
Localizzazione sito	87%	costa	

ABWR	Tempo di costruzione		
		[giorni]	[anni]
	Min	1183	3,2
	Max	1415	3,9
	Media	1274	3,5
Unità costruite	4	P _{nom} [MW _e]	5200
Localizzazione sito	100%	costa	
Unità in costruzione	2	P _{nom} [MW _e]	2600
Localizzazione sito	100%	costa	



VVER-1000	Tempo di costruzione		
		[giorni]	[anni]
	Min	1855	5,1
	Max	5171	14,2
	Media	2989	8,2
Esemplari costruiti	6	P _{nom} [MW _e]	6000
Localizzazione sito	100%	costa	
Unità in costruzione	5	P _{nom} [MW _e]	5000
Localizzazione sito	100%	costa	

CAP-1400			
Unità in costruzione	2	P _{nom} [MW _e]	2800
Localizzazione sito	100%	costa	

CAP-1000			
Unità in costruzione	7	P _{nom} [MW _e]	8400
Localizzazione sito	100%	costa	

VVER-TOI (V-510)			
Unità in costruzione	2	P _{nom} [MW _e]	2400
Localizzazione sito	100%	Bacino artificiale alimentato dal fiume Reka	

ACP 1000 / ACPR 1000 / HPR 1000 'Hualong One'	Tempo di costruzione		
		[giorni]	[anni]
	Min	1709	4,7
	Max	2665	7,3
	Media	2210	6,1
Esemplari costruiti	10	P _{nom} [MW _e]	10000
Localizzazione sito	100%	costa	
Unità in costruzione	11	P _{nom} [MW _e]	11000
Localizzazione sito	100%	costa	

IPHWR-700	Tempo di costruzione		
		[giorni]	[anni]
	Min	3703	10,1
	Max	4839	13,3
	Media	4271	11,7
Esemplari costruiti	2	P _{nom} [MW _e]	1260
Localizzazione sito	100%	entroterra in prossimità del fiume Tapi	
Unità in costruzione	2	P _{nom} [MW _e]	1260
Localizzazione sito	100%	entroterra, in prossimità del bacino artificiale Rana Pratap	

APR-1400	Tempo di costruzione		
		[giorni]	[anni]
	Min	2648	7,3
	Max	3838	10,5
	Media	3221	8,8
Unità costruite	8	P _{nom} [MW _e]	11200
Localizzazione sito	100%	costa	
Unità in costruzione	2	P _{nom} [MW _e]	2800
Localizzazione sito	100%	costa	

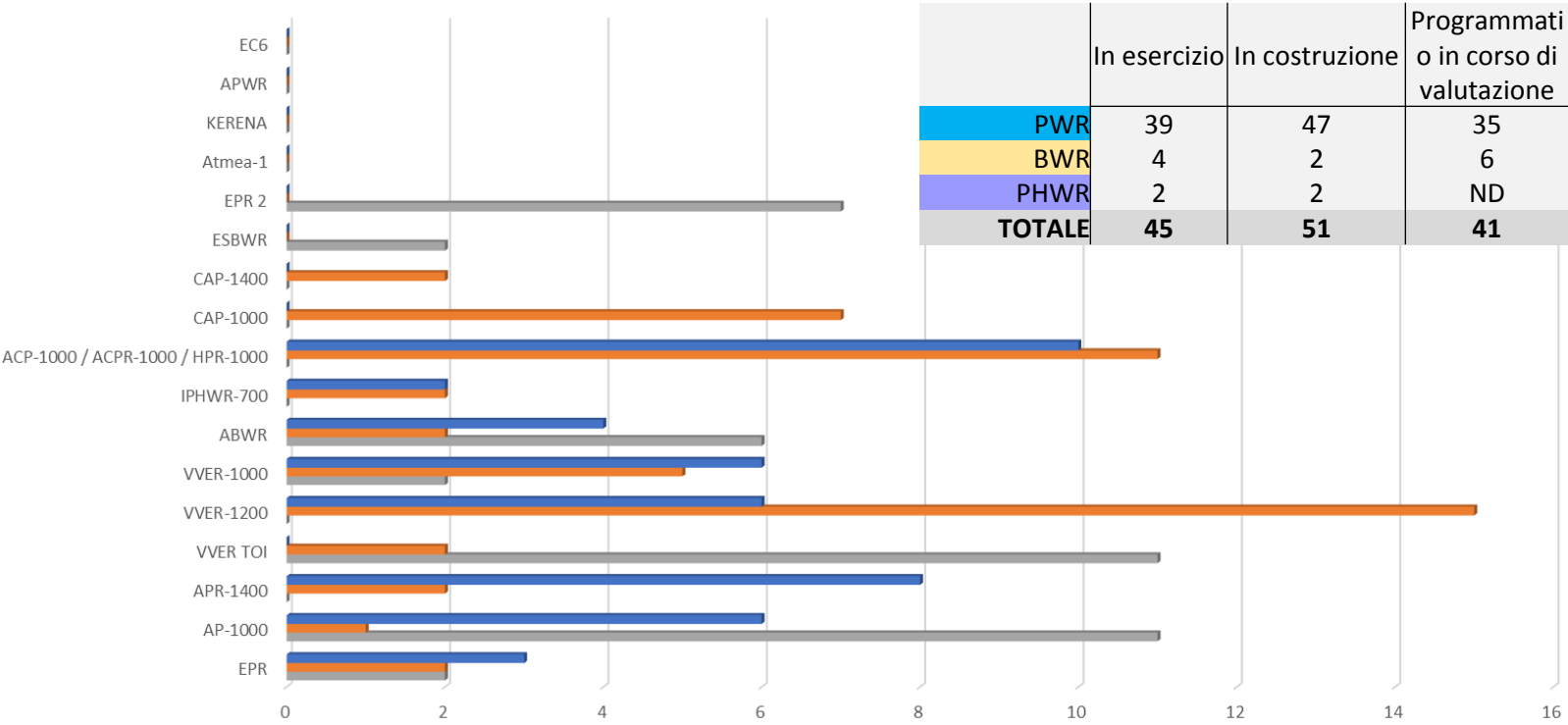
Ing. Giuseppe Canzone

Reattori in esercizio e in costruzione per la produzione di energia elettronucleare - Survey internazionale



Il mercato dei reattori di grande taglia (3-3)

Reattori di III Gen /IIIGen+ nel mondo
Luglio 2024



	EPR	AP-1000	APR-1400	VVER TOI	VVER-1200	VVER-1000	ABWR	IPHWR-700	ACP-1000 / ACPR-1000 / HPR-1000	CAP-1000	CAP-1400	ESBWR	EPR 2	Atmea-1	KERENA	APWR	EC6
Unità in esercizio	3	6	8	0	6	6	4	2	10	0	0	0	0	0	0	0	0
Unità in costruzione	2	1	2	2	15	5	2	2	11	7	2	0	0	0	0	0	0
Unità programmate o in corso di valutazione	2	11	0	11	0	2	6	0	0	0	0	2	7	0	0	0	0

SMR e reattori avanzati operativi e in costruzione

OPERATIVI								
Reattore	Impianto / Unità	Stato	Potenza nominale	Tipo	Progettista / Proprietario / Operatore	Inizio costruzione	Primo collegamento alla rete elettrica	Tempo di costruzione [anni]
KLT-40S 'marine based'	AKADEMIK LOMONOSOV-1	Russia	35 MWe	PWR	OKBM, Proprietario e operatore: Joint Stock Company 'Concern Rosenergoatom'	15/04/2007	19/12/2019	12,7
	AKADEMIK LOMONOSOV-2	Russia	35 MWe	PWR	OKBM, Proprietario e operatore: Joint Stock Company 'Concern Rosenergoatom'	15/04/2007	19/12/2019	12,7
RITM-200	Operativo a bordo dei rompighiaccio Arktika, Sibir and Ural (Project 22220)	Russia	50 MWe	Integral PWR, propulsione navale, in futuro applicazioni terrestri come SMR	OKBM / ND / ND	ND	01/10/2019 (entrata in servizio del rompighiaccio Arktika)	ND
HTR-PM	SHIDAO BAY 1 (SHIDAOWAN 1), 2 unità HTGR in un unico edificio di contenimento	Cina	210 MWe	HTGR	INET, Proprietario: China Huaneng Group, Operatore: Huaneng Shandong Shidao Bay Nuclear Power Company, Ltd.	09/12/2012	14/12/2021	9,0
BN-600	Beloyarsk 3	Russia	560 MWe	reattore veloce refrigerato a sodio	ND / Proprietario e operatore: Joint Stock Company 'Concern Rosenergoatom'	01/01/1969	08/04/1980	11,3
BN-800	Beloyarsk 4	Russia	820 MWe	reattore veloce refrigerato a sodio	ND / Proprietario e operatore: Joint Stock Company 'Concern Rosenergoatom'	18/07/2006	10/12/2015	9,4

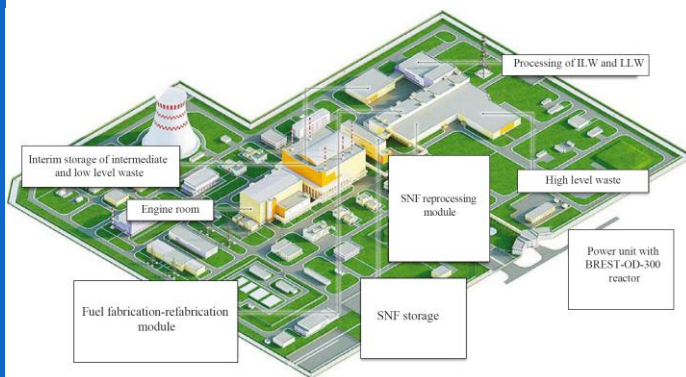
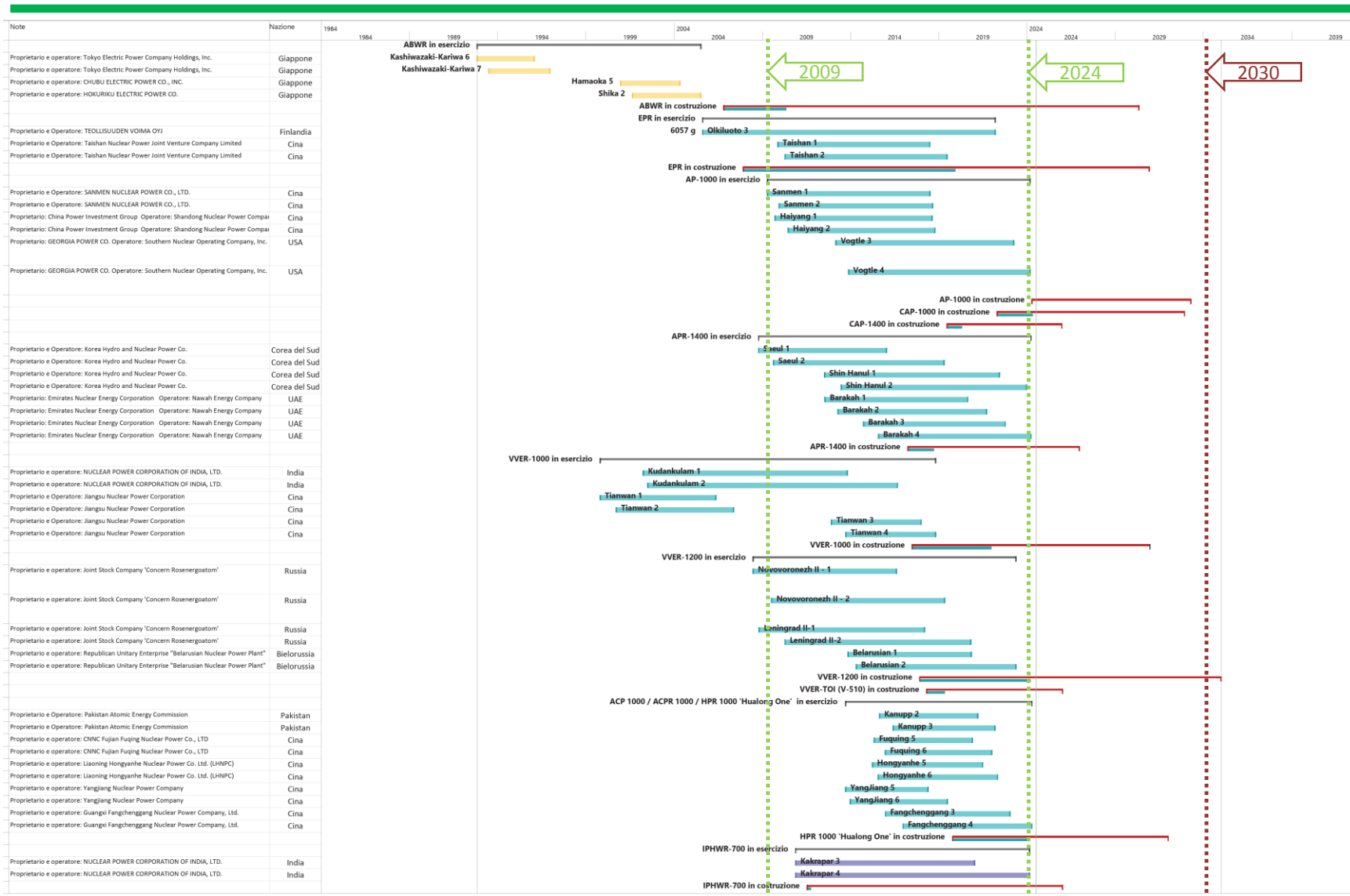


Immagine tratta da :
<https://link.springer.com/article/10.1134/S1066362223020017/figures/7>

IN COSTRUZIONE								
Reattore	Impianto / Unità	Stato	Potenza nominale	Tipo	Progettista / Proprietario / Operatore	Inizio costruzione	Primo collegamento alla rete elettrica	Tempo di costruzione [anni]
CAREM25	Lima NPP	Argentina	27 MWe	Integral PWR	CNEA & INVAP			
ACP-100	Linglong 1	Cina	125 MWe	Integral PWR	CNNC, Hainan Nuclear Power Company	13/07/2021	ND	ND
BREST-OD-300	Seversk, impianto di Siberian Chemical Combine	Russia	300 MWe	reattore veloce refrigerato a piombo + impianto pilota di riprocessamento in situ	RDIP/Rosatom	08/06/2021	2026	5,5
PFBR	Madras NPP	India	470 MWe	reattore veloce refrigerato a sodio	Bharatiya Nabhikiya Vidyut Nigam Limited, India	23/10/2004	ND	ND
CFR-600	Xiapu-1	Cina	640 MWe	reattore veloce refrigerato a sodio	Proprietario: CNNC Longyuan Technology Co., Ltd. Operatore: CNNC Longyuan Technology Co., Ltd.	29/12/2017	ND	ND
	Xiapu-2	Cina	640 MWe	reattore veloce refrigerato a sodio	Proprietario: CNNC Longyuan Technology Co., Ltd. Operatore: CNNC Longyuan Technology Co., Ltd.	27/12/2020	ND	ND



Reattori di III Gen / III Gen+ in esercizio (11 luglio 2024)



Ing. Giuseppe Canzone

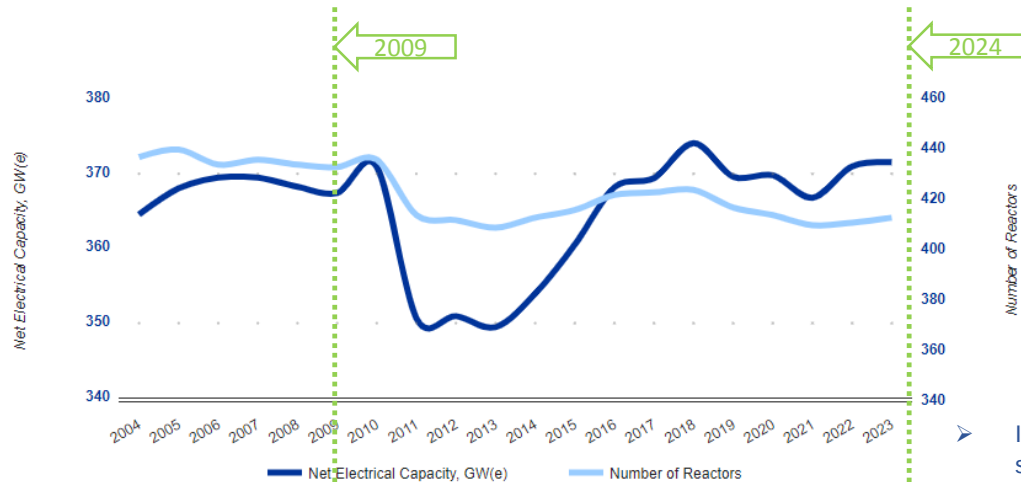
Reattori in esercizio e in costruzione per la produzione di energia elettronucleare - Survey internazionale



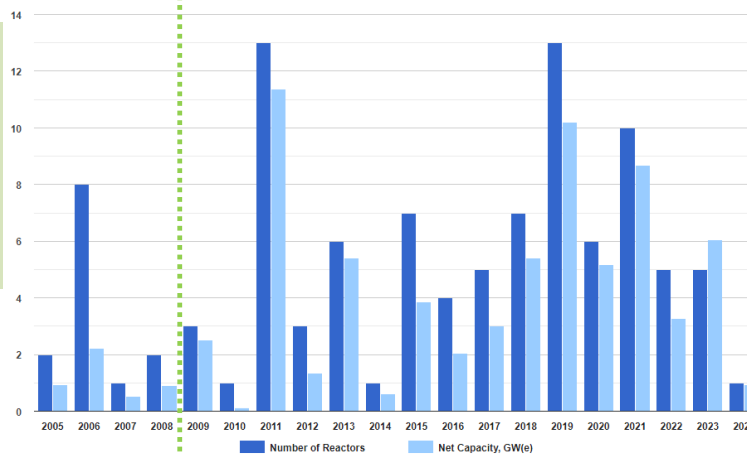
Reattori in esercizio e in costruzione per la produzione di energia elettronucleare - Survey internazionale

Conclusioni

NUCLEAR POWER CAPACITY TREND



Shutdown Reactor Statistics



Nel periodo 2009-2024 sono stati scollegati dalla rete 90 reattori per una potenza complessiva di circa 72 GWe

Fonte dei grafici, <https://pris.iea.org/PRIS/home.aspx>

Potenza complessiva dei reattori di III Gen IN ESERCIZIO al 2024	53	GWe
Potenza complessiva reattori di III Gen IN COSTRUZIONE	60	GWe

	In esercizio	In costruzione	Programmati o in corso di valutazione
PWR	39	47	35
BWR	4	2	6
PHWR	2	2	ND
TOTALE	45	51	41

- I reattori nucleari di III Gen+ sono l'unica tecnologia allo stato dell' arte in grado di fornire elettricità a bassa emissione di carbonio e che può essere dispiegata nella scala e nei tempi necessari (tempo medio di costruzione 8,8 anni/unità) a sostenere la crescita e a garantire la stabilità della fornitura di energia elettrica (carico di base) nel medio-lungo periodo (durata per singola unità 60 anni + min20 anni di life extension).
- La maggior parte dei progetti proposti dai vari paesi sono destinati anche all' esportazione.
- Il trend conferma la prevalenza commerciale dei reattori ad acqua leggera pressurizzata (PWR), anche se...
- ...I reattori ad acqua bollente (es. tipo ABWR), a parità di potenza (1300 MWe), al momento, vantano il minor tempo di costruzione (circa 4 anni/unità).

Gli SMR e altre tipologie di reattori avanzati (in particolare i reattori a spettro veloce), a partire presumibilmente dal prossimo decennio, andranno a costituire il **COMPLEMENTO** ai grandi reattori (deputati al mantenimento del carico di base della produzione elettrica), **ampliando le applicazioni e gli scenari adatti all'uso dell'energia nucleare**, nell'industria, a sostegno della filiera di produzione dell' idrogeno e della produzione di calore.

Ing. Giuseppe Canzone

Reattori in esercizio e in costruzione per la produzione di energia elettronucleare - Survey internazionale

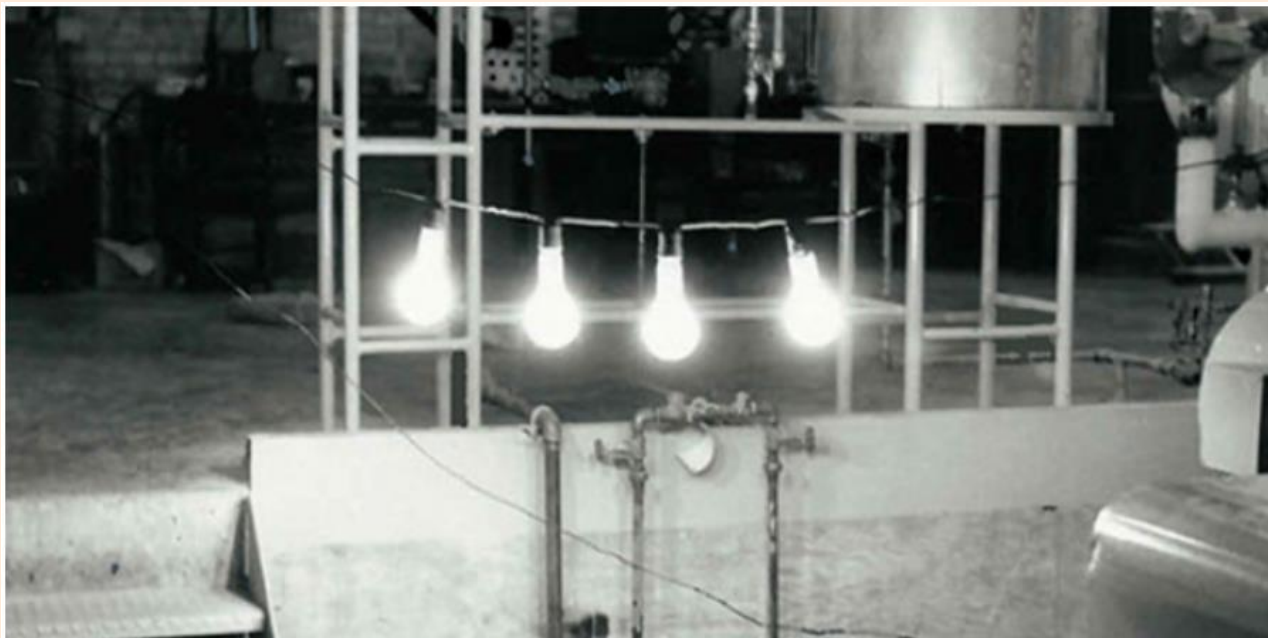


Bibliografia e Approfondimenti

1. IAEA, *Advanced Large Water Cooled Reactors*, A supplement to the IAEA's Advanced Reactor Information System (ARIS), Vienna 2015 (https://aris.iaea.org/Publications/IAEA_WRC_Booklet.pdf)
2. IAEA, *Advanced Large Water Cooled Reactors*, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), 2020 Edition (https://aris.iaea.org/Publications/20-02619E_ALWCR_ARIS_Booklet_WEB.pdf)
3. <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>
4. <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/summary>
5. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Super-module-installed-at-first-Lianjiang-unit>
6. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Work-under-way-for-first-Westinghouse-AP1000-in-Uk>
7. <https://www.power-technology.com/news/westinghouse-have-started-the-construction-of-a-ap1000-reactor-in-ukraine/?cf-view>
8. AA.VV, *The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World*, AN INTERDISCIPLINARY MIT STUDY, 2018 Massachusetts Institute of Technology
9. ADVANCES IN SMALL MODULAR REACTOR TECHNOLOGY DEVELOPMENTS, 2020 Edition, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) <http://aris.iaea.org>, Austria 2020
10. <https://www.gen-4.org/>
11. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Demonstration-HTR-PM-grid-connected>
12. https://www.tvcl.ru/en/press-center/news/?ELEMENT_ID=8787
13. <https://rosatomnewsletter.com/2023/05/29/lead-cooled-reactor-made-tangible/>



Grazie per l'attenzione



On December 20, 1951, EBR-I became the first power plant to produce usable electricity through atomic fission. It powered four 200-watt light bulbs and eventually generated enough electricity to light the entire facility. (Photo: DOE)

"At 1:23 p.m. load dissipaters from the generator were connected—electricity flows from atomic energy." These were the words Walter Zinn wrote in the log after the first four light bulbs were illuminated by nuclear energy. The year was 1951, and the EBR-I was about to show the world what nuclear energy had to offer.

Tratto dall' articolo «*The Legacy of the Experimental Breeder Reactor -I-*», American Nuclear Society 31 Gennaio 2023 (<https://www.ans.org/news/article-4609/the-legacy-of-experimental-breeder-reactor/>)