

# **Applicazioni dei materiali superconduttori**

# La “storia” della superconduttività

1911	Kamerlingh-Onnes osserva la transizione dallo stato normale a quello superconduttivo di un campione di Mercurio a 4.19 K
1957	Bardeen, Cooper e Schrieffer propongono una teoria microscopica della superconduttività (Teoria BCS)
1973	Superconduttività del $\text{Nb}_3\text{Ge}$ a 23.2 K
1986	Bednorz and Mueller osservano lo stato superconduttivo di $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ a 30 K
1987	Superconduttività Y-Ba-Cu-O (YBCO) a 93 K
1988	Superconduttività Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO) a 125 K
2001	Superconduttività $\text{MgB}_2$ a 40 K

# Materiali superconduttori

Heike Kamerlingh Onnes, 1911

- Superconduttori del tipo I
- Superconduttori del tipo II a bassa temperatura di transizione
- Superconduttori del tipo II ad elevata temperatura di transizione

KNOWN SUPERCONDUCTIVE ELEMENTS

■ BLUE = AT AMBIENT PRESSURE  
■ GREEN = ONLY UNDER HIGH PRESSURE

1	2											10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20													
1	2											10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20													
3	4											5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20								
11	12											13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
55	56	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	87	88	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110	111	112						
87	88	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110	111	112																								

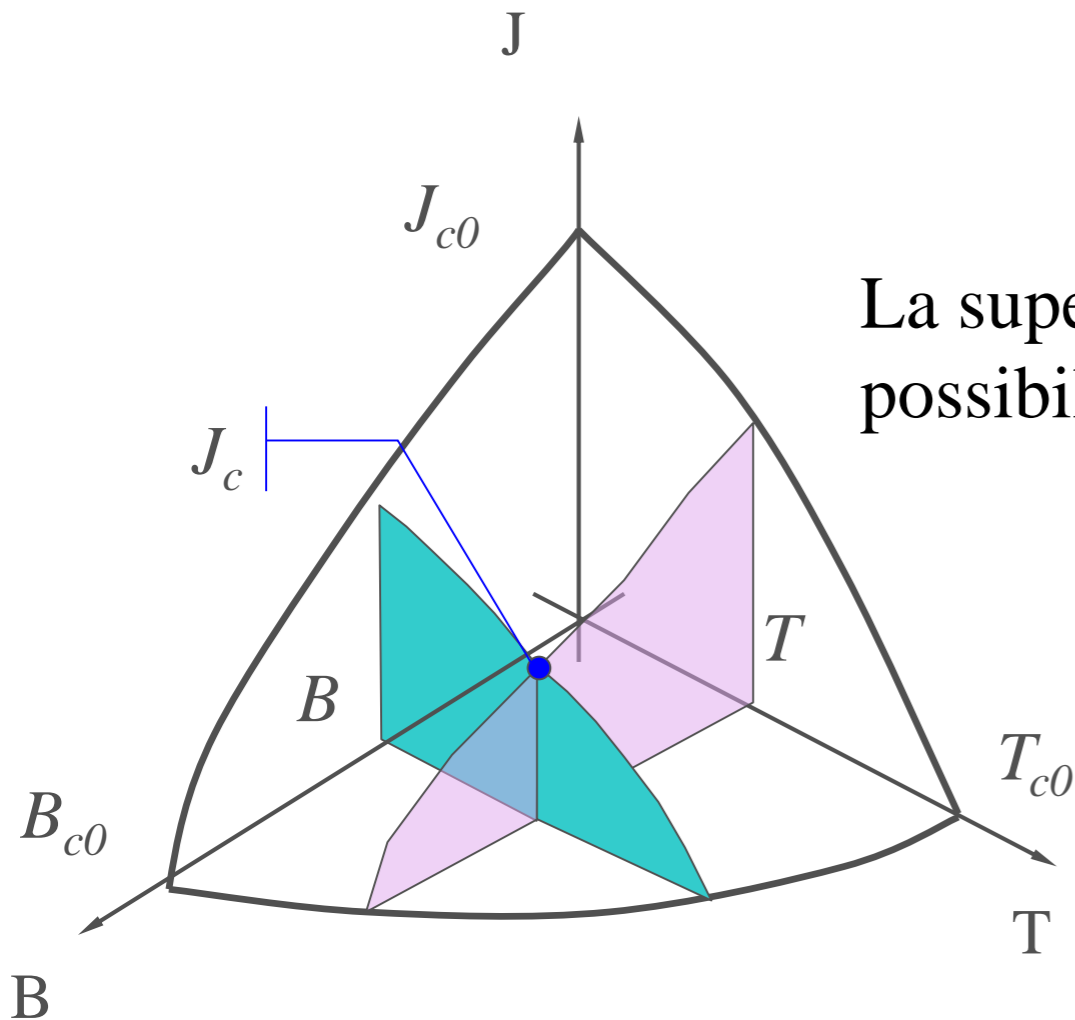
SUPERCONDUCTORS.ORG

\* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr



La superficie critica individua tutte le condizioni possibili per la presenza dello stato superconduttivo

I superconduttori di tipo I presentano l'effetto Meissner (espulsione del campo) ma non trovano applicazione

Nei superconduttori del tipo II il campo penetra nel superconduttore concentrandosi in regioni normali (flussoidi) ciascuna corrispondente ad un flusso  $\Phi_0 = h/2e = 2.0678 \cdot 10^{-15}$  Wb

# Superconduttori del tipo II a bassa temperatura di transizione

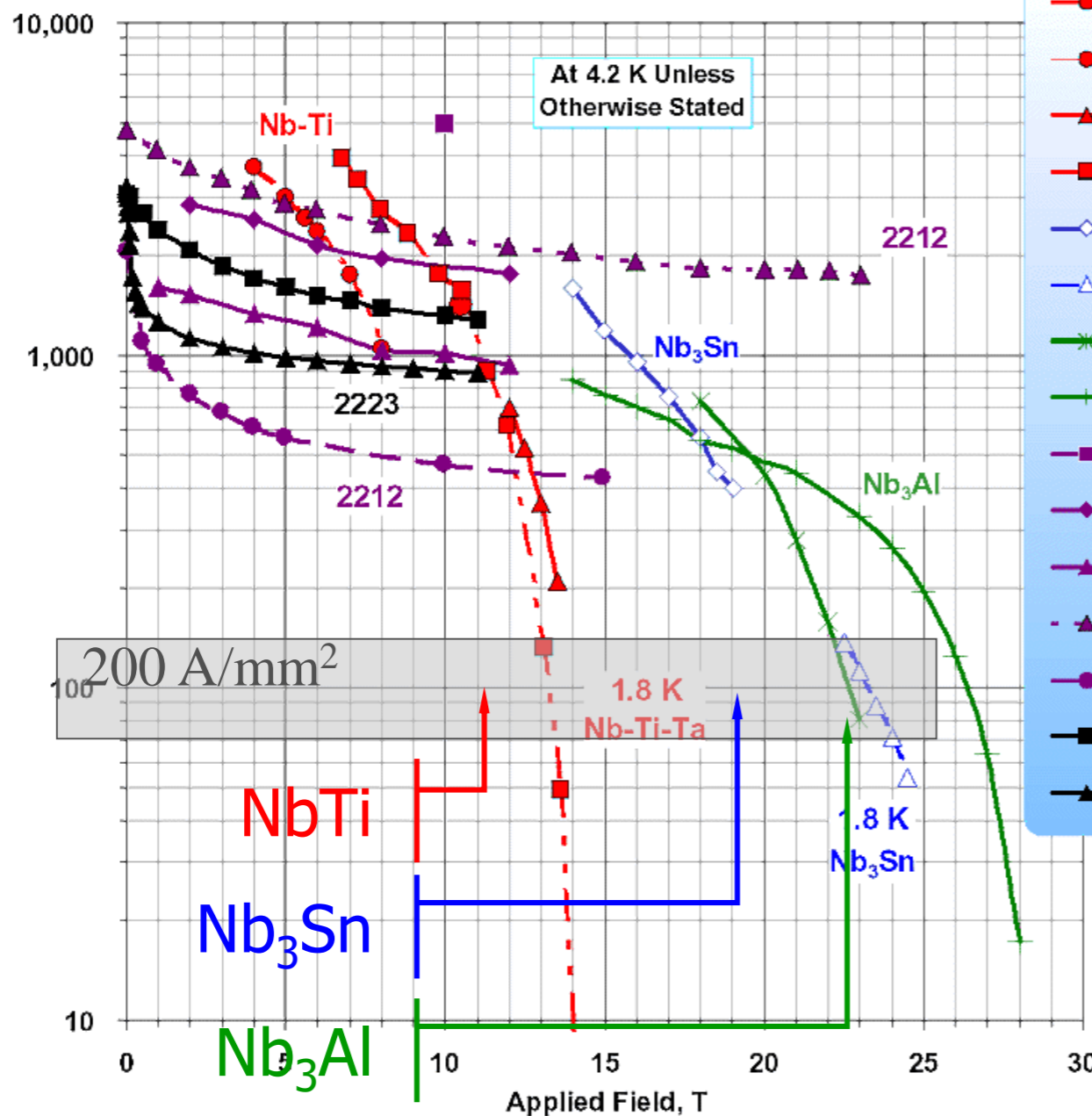
(temperatura critica compatibile con la tecnologia dell'elio liquido)

## Advancing Critical Currents in Superconductors

University of Wisconsin-Madison  
Applied Superconductivity Center

October 2000 - Compiled by Peter J. Lee  
jcprog00b-white100m.ppt, jcprog00b.xls

Critical Current  
Density, A/mm<sup>2</sup>

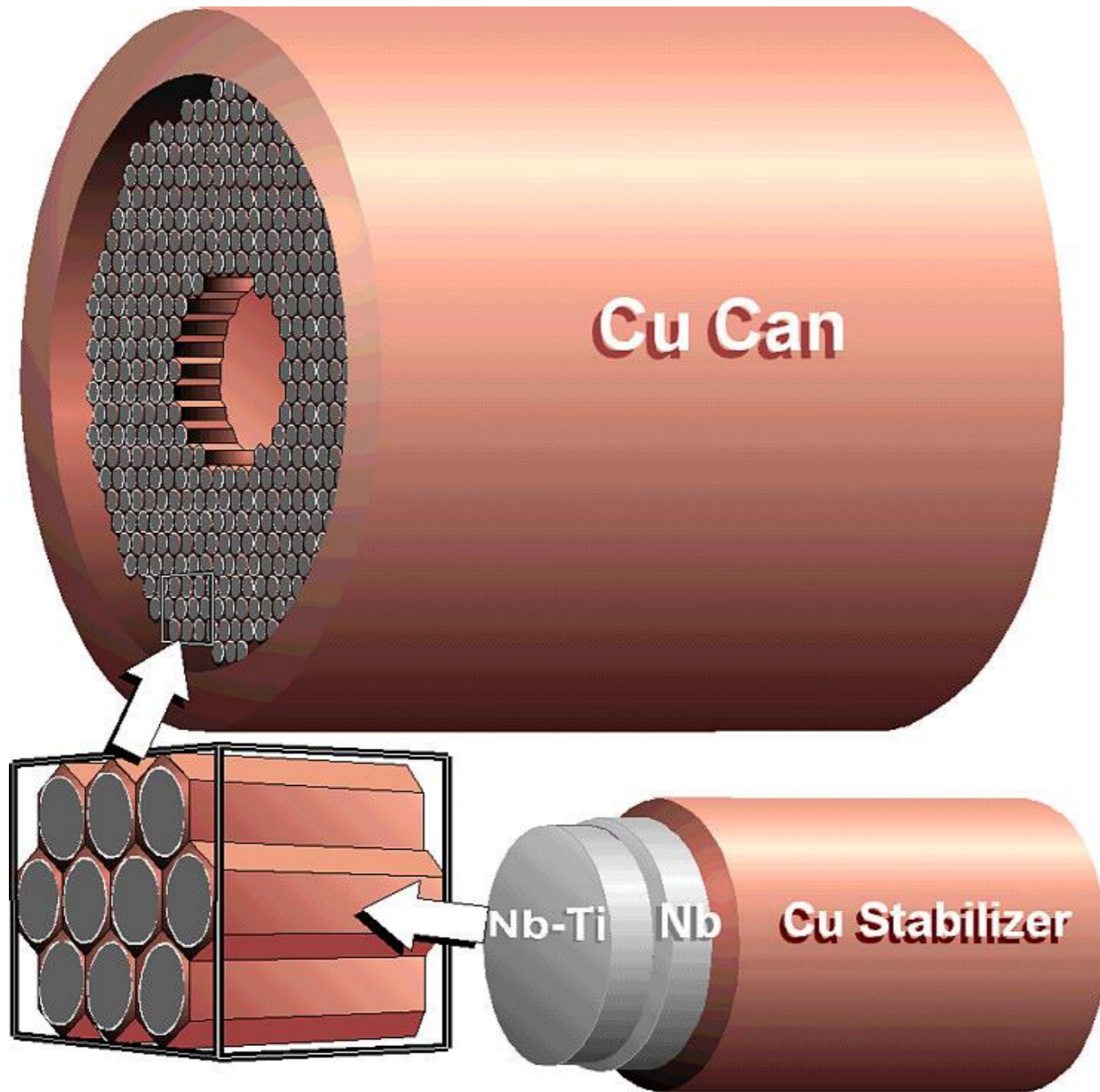


- Nb-Ti: Example of Best Industrial Scale Heat Treated Composites ~1990 (compilation)
- Nb-Ti(Fe): 1.9 K, Full-scale multifilamentary billet for FNAL/LHC (OS-STG) ASC'98
- ▲ Nb-44wt.%Ti-15wt.%Ta: 1.8 K, monofil. optimized for high field, unpubl. Lee, Naus and Larbalestier (UW-ASC) '96
- Nb-37Ti-22Ta: at 2.05 K, 210 fil. strand, 400 h total HT, Chernyi et al. (Kharkov), ASC2000
- ◇ Nb<sub>3</sub>Sn: Internal Sn High J<sub>c</sub> design ORe0038, OI-STG, Zhang et al. ASC'98 Paper MAA-06
- △ Nb<sub>3</sub>Sn: Bronze route VAC 62000 filament, non-Cu J<sub>c</sub> 1.8 K 0.1μΩ-m, VAC/NHMFL data courtesy M. Thoener.
- \* Nb<sub>3</sub>Al: Nb stabilized 2-stage JR process (Hitachi,TML-NRIM,IMR-TU), Fukuda et al. ICMC/ICEC '96
- Nb<sub>3</sub>Al: DRHQ with Intermediate cold-work, core J<sub>c</sub>, Kikuchi et al. (NRIM) ASC2000
- Bi-2212: 3-layer tape (0.15-0.2 mm 4.0-4.8 mm) B||tape face at 4.2 K -Kitaguchi et al, ISS'98, 1μV/cm
- ◆ Bi-2212: paste 4.2 K Hasegawa et al. (Showa) IWS'95, B||tape
- ▲ Bi-2212: stack 4.2 K Hasegawa et al. (Showa) IWS'95, B||tape
- ▲ Bi-2212: 19 filament tape B||tape face - Okada et al. (Hitachi) '95
- Bi-2212: Round multifilament strand - 4.2 K (IGC) Motowidlo et al. ISTE/MRS '95
- Bi 2223: Rolled 85 Fil. Tape (AmSC) B||, UW'6/96
- ▲ Bi 2223: Rolled 85 Fil. Tape (AmSC) B|\_, UW'6/96



same  $\approx 6 \text{ A/mm}^2$

# Fili superconduttori (strand)

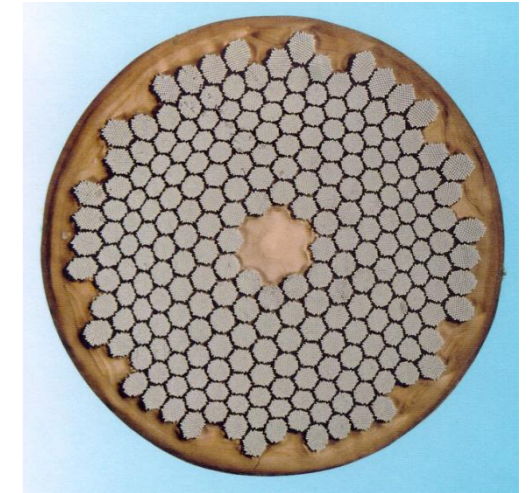


estrusione a  
freddo

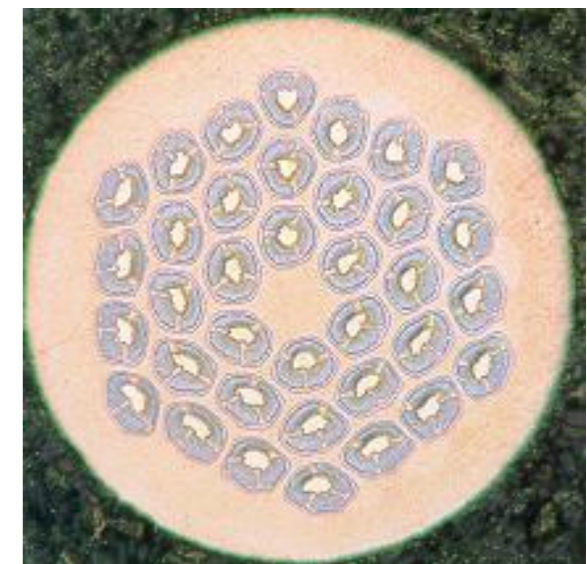


trattamento  
termico

**NbTi**

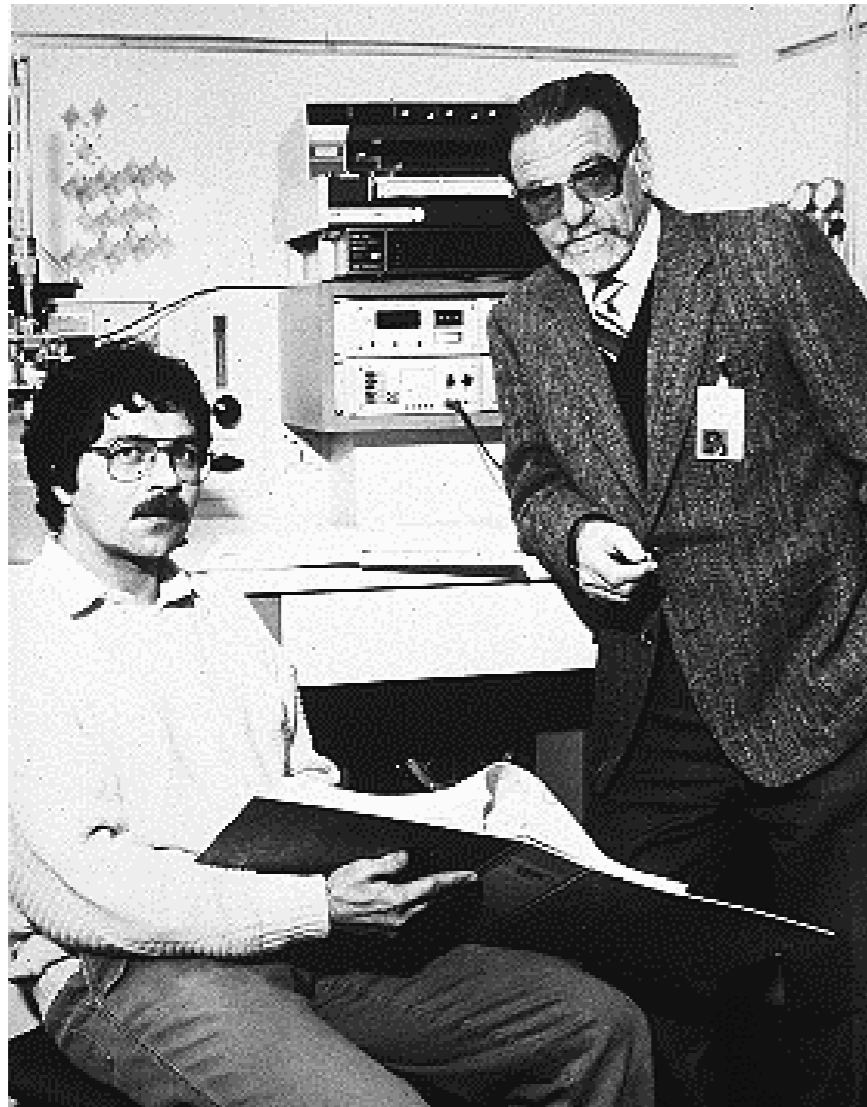


≈ 1 mm

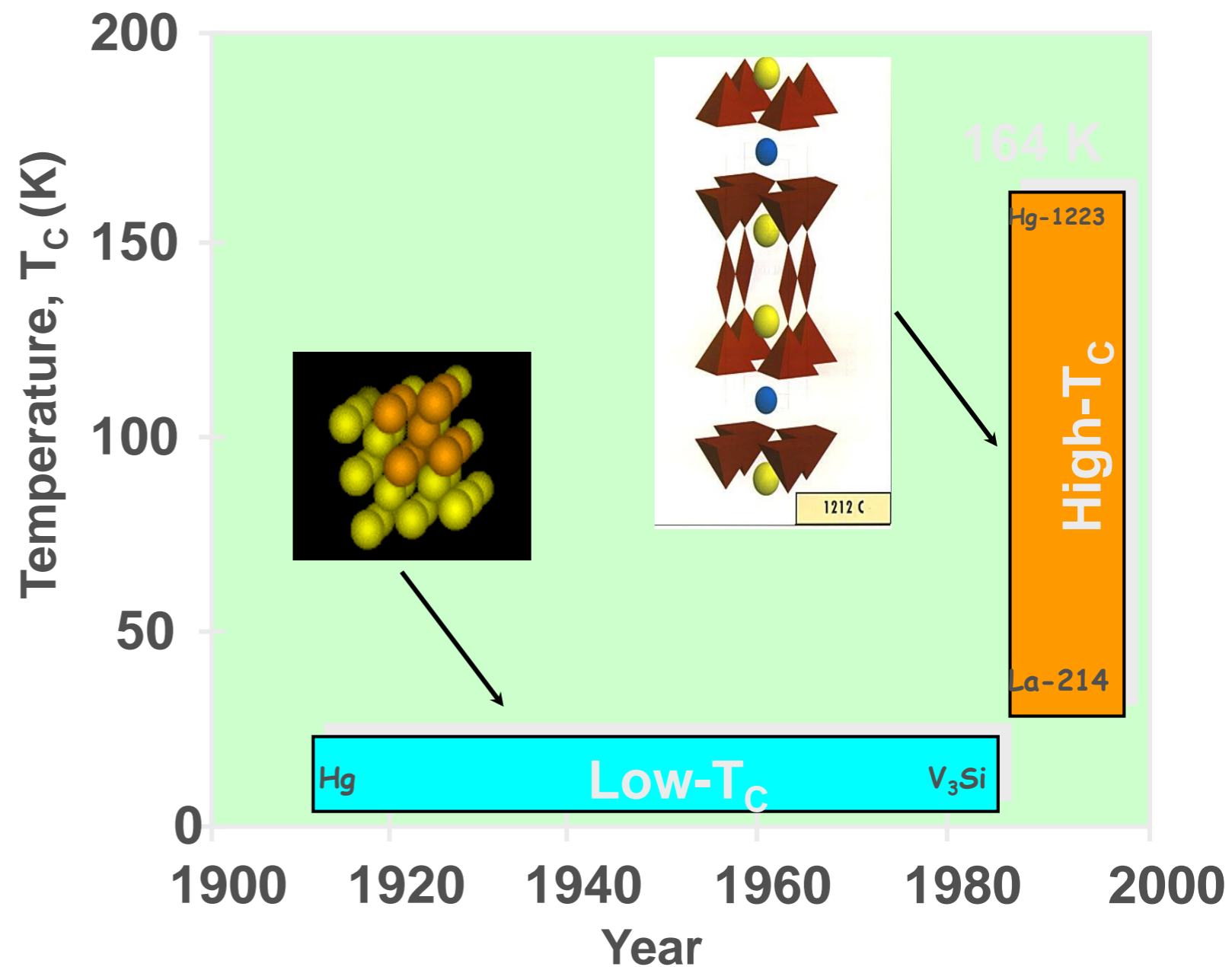


**Nb3Sn**

# Superconduttori del tipo II ad elevata temperatura di transizione

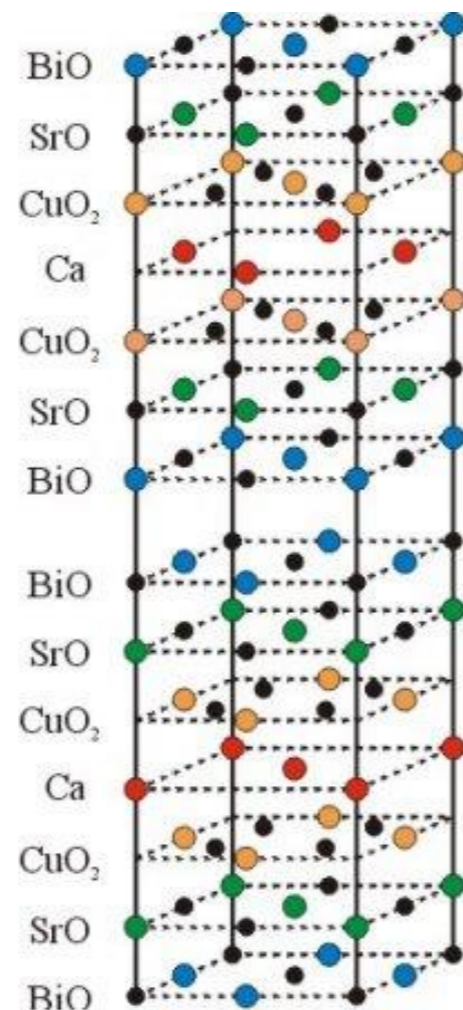


Bednorz and Mueller  
IBM Zuerich, 1986

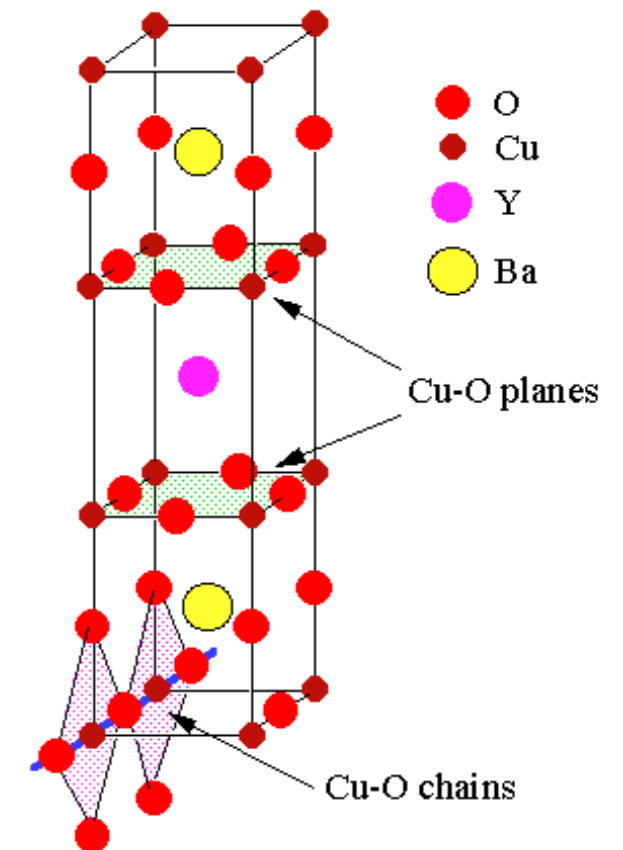


# Materiali superconduttori ad alta temperatura critica (HTSC)

**BSCCO**



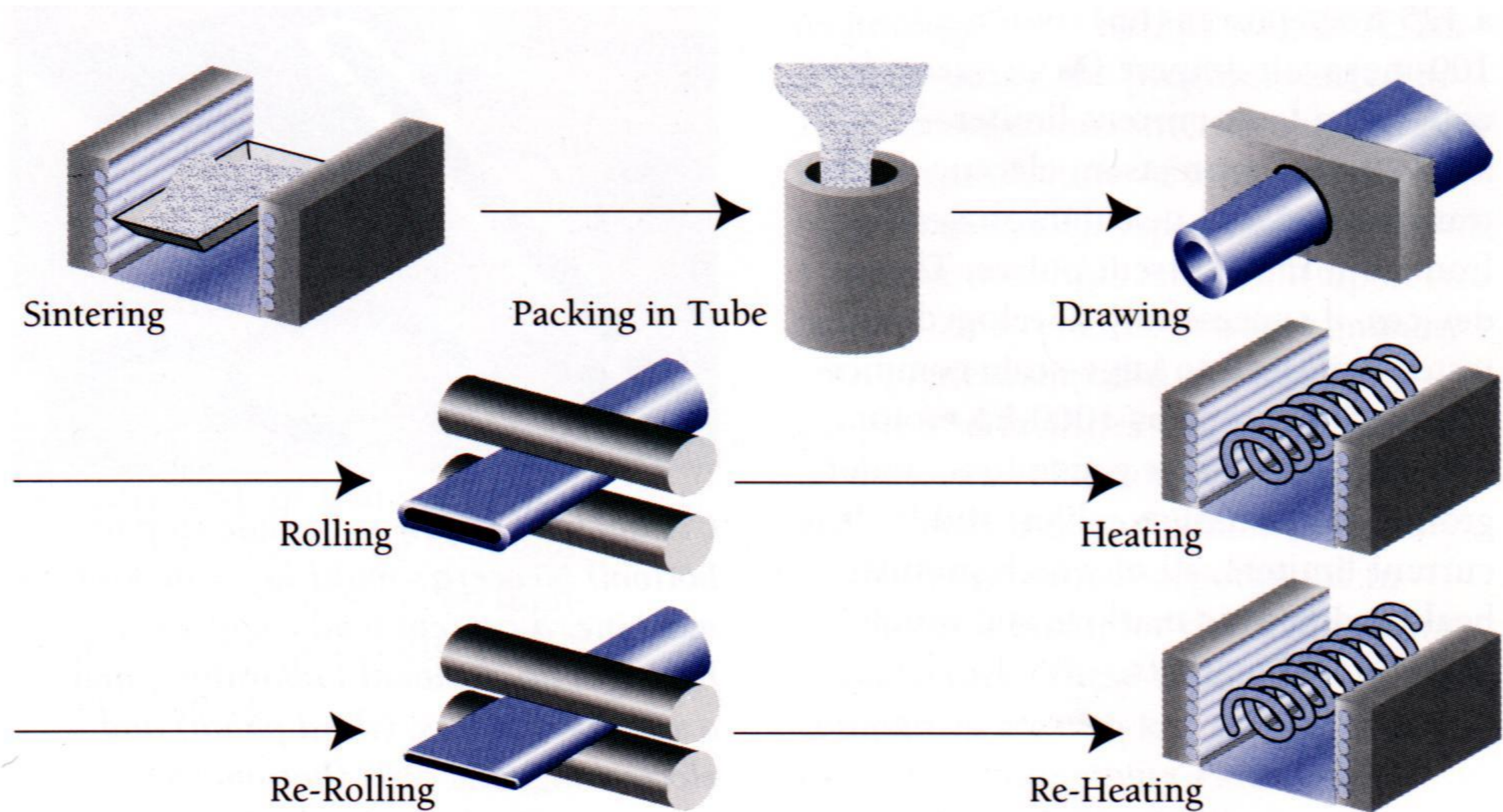
**YBCO**



- Temperatura critica compatibile con la tecnologia dell'azoto liquido
- Campo critico superiore molto più elevato
- Fragili, scarsamente duttili e malleabili
- Forte anisotropia
- Processi di sintesi lunghi e costosi
- Scarsa densità di corrente critica ( $2 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$  a 77K, in corrente continua campo nullo, contro  $10^5 \text{ A/cm}^2$  a 4.2K per superconduttori metallici)
- Forte dipendenza di  $J_c$  dalla deformazione

# Tecnologia di realizzazione dei nastri

## Tecnica Powder in Tube (PIT)

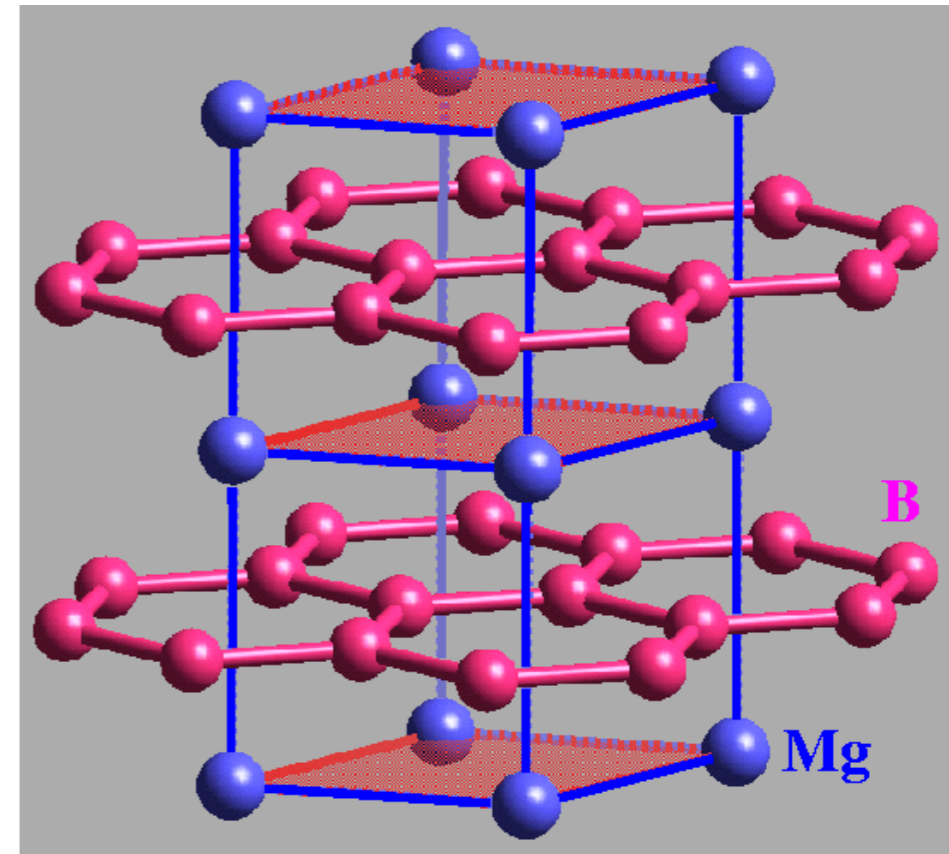
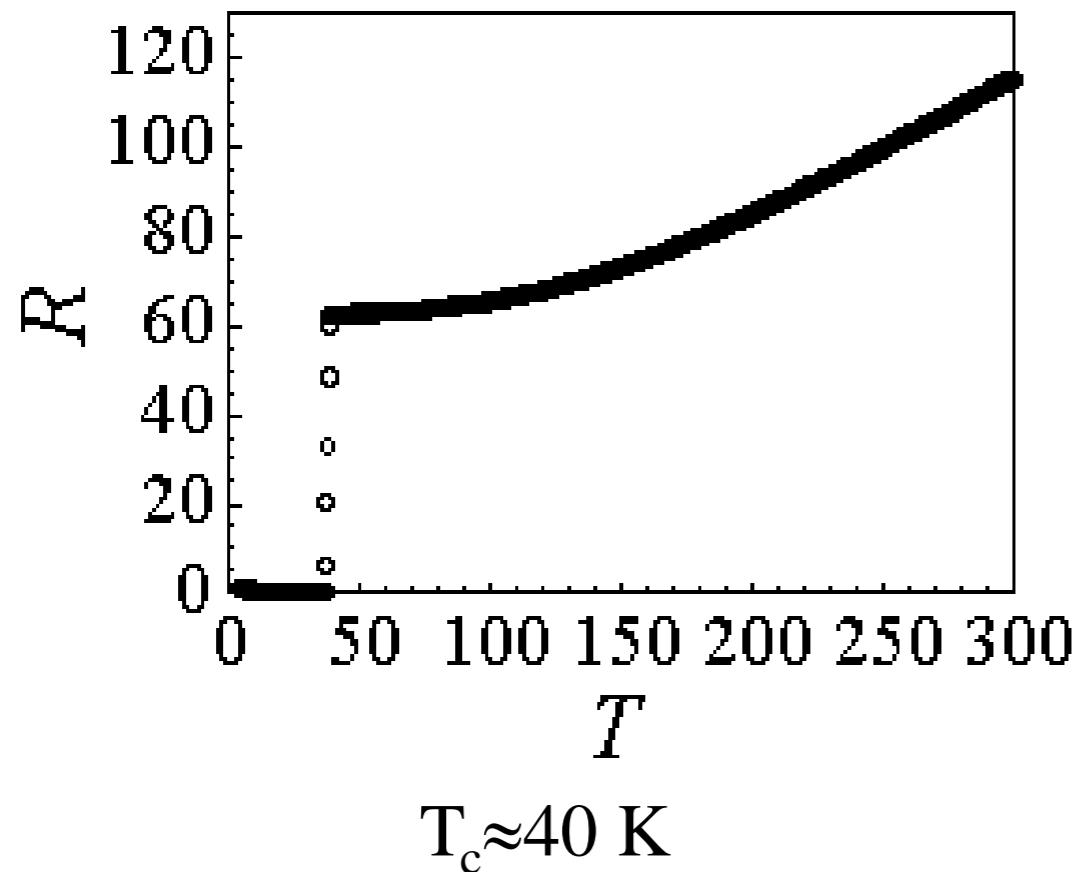


*Powder-in-tube wire/coil making process.*



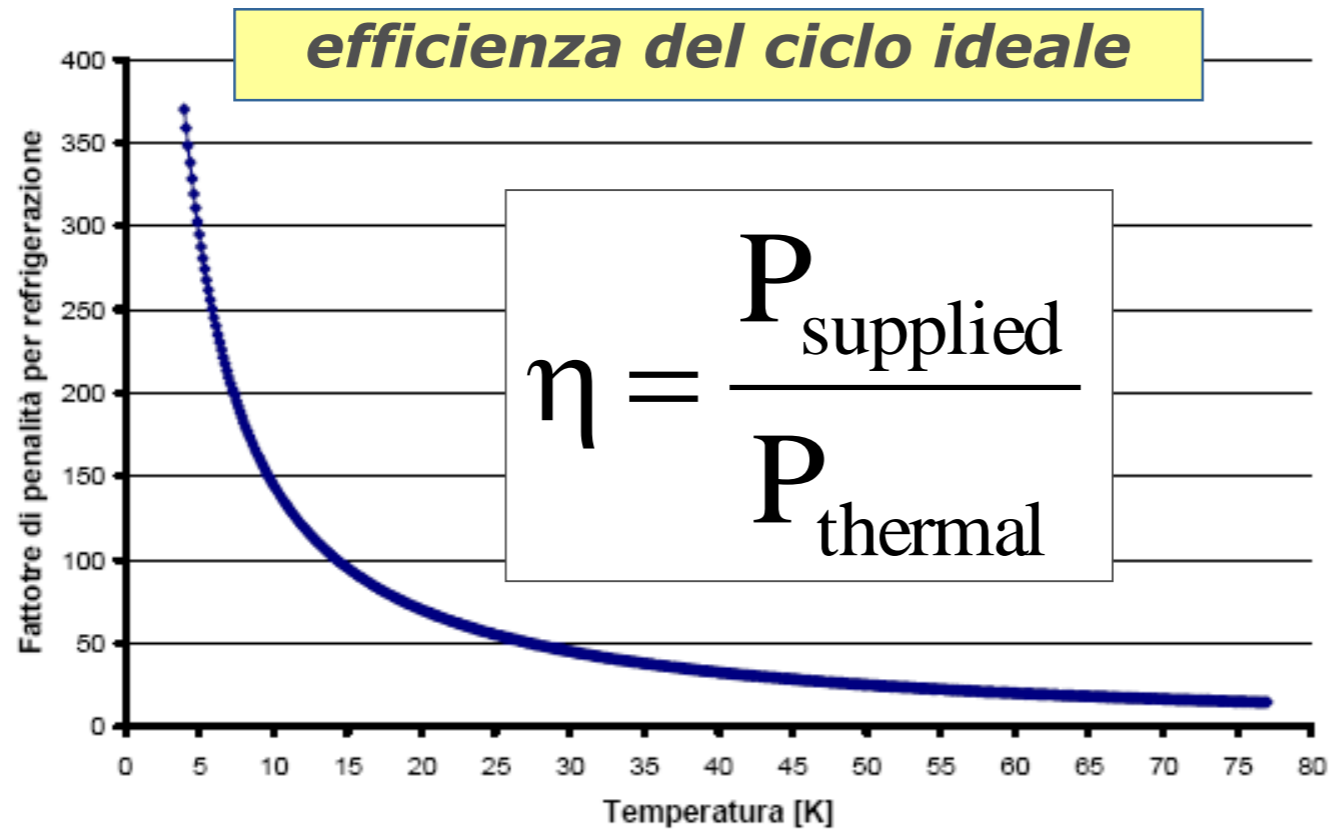
# Diboruro di magnesio ( $\text{MgB}_2$ )

J. Akimitsu, Symp. on Transition Metal Oxides, Sendai, Jan 2001



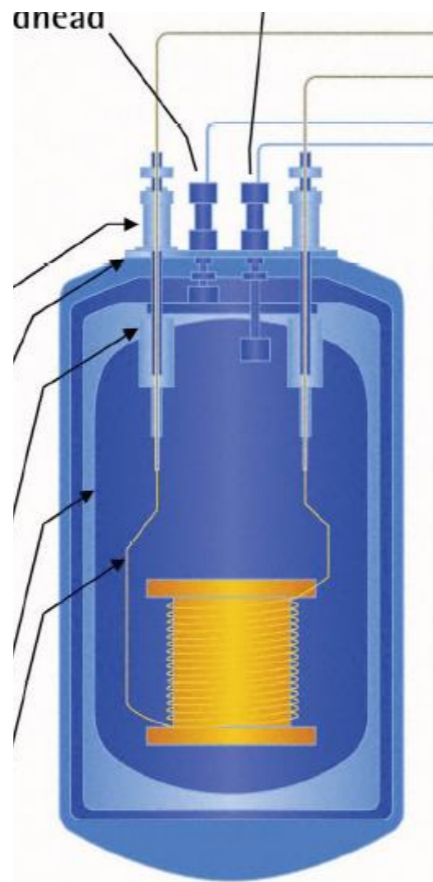
- Facilmente lavorabile (si possono produrre fili)
- Tecnologia di produzione nota
- Basso costo
- Temperatura critica compatibile con quella dell'idrogeno liquido
- Proprietà elettriche scadenti ad elevati campi magnetici

# Refrigerazione



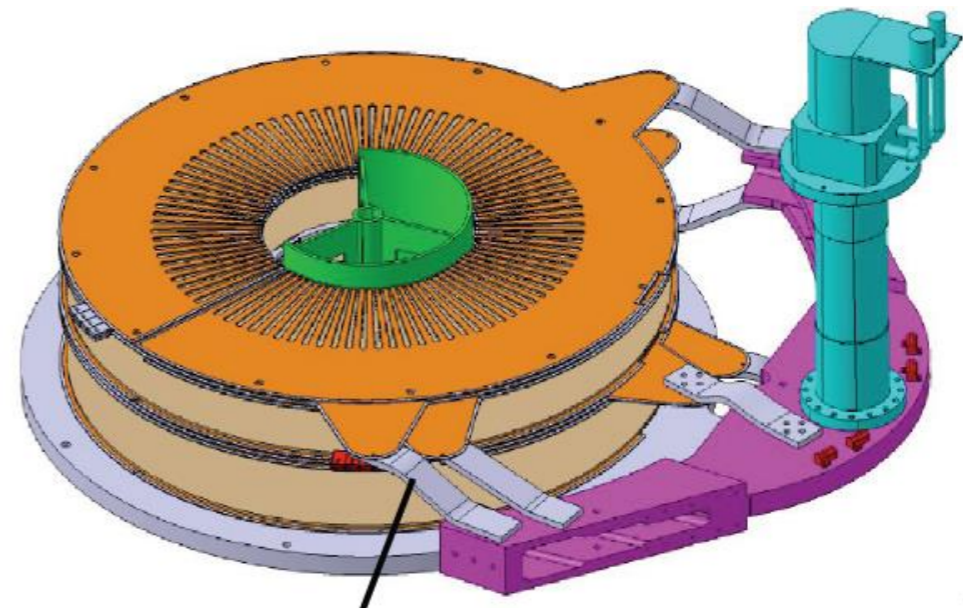
**$\sim 50 \text{ W/W}_{th}$   
a 30 K**

**raffreddamento mediante liquido a ciclo chiuso**



**Ricondensazione  
(potenza elettrica)**

**raffreddamento cryogen free**



**potenza elettrica**

# Proprietà dei superconduttori

- **Resistività nulla** (in dc)

*Alta efficienza energetica*

*Accumulo energia magnetica*

- **Perfetto diamagnetismo** ( $B < B_{c1}$ ), capacità di intrappolare il campo magnetico ( $B < B_{c2}$ )

*Levitazione magnetica*

- **Elevata densità di corrente**

*Elevata potenza*

- **Transizione allo stato normale**

*Impedenze non lineari (limitatori)*

- Un superconduttore è rigorosamente privo di perdite solo in condizioni stazionarie (DC). In condizioni dinamiche (AC) si verificano fenomeni dissipativi (perdite per isteresi e perdite per accoppiamento)

- Una transizione localizzata innescata da una piccola energia può estendersi a tutto il volume del superconduttore compromettendo la funzionalità e la sicurezza del dispositivo (Quench)

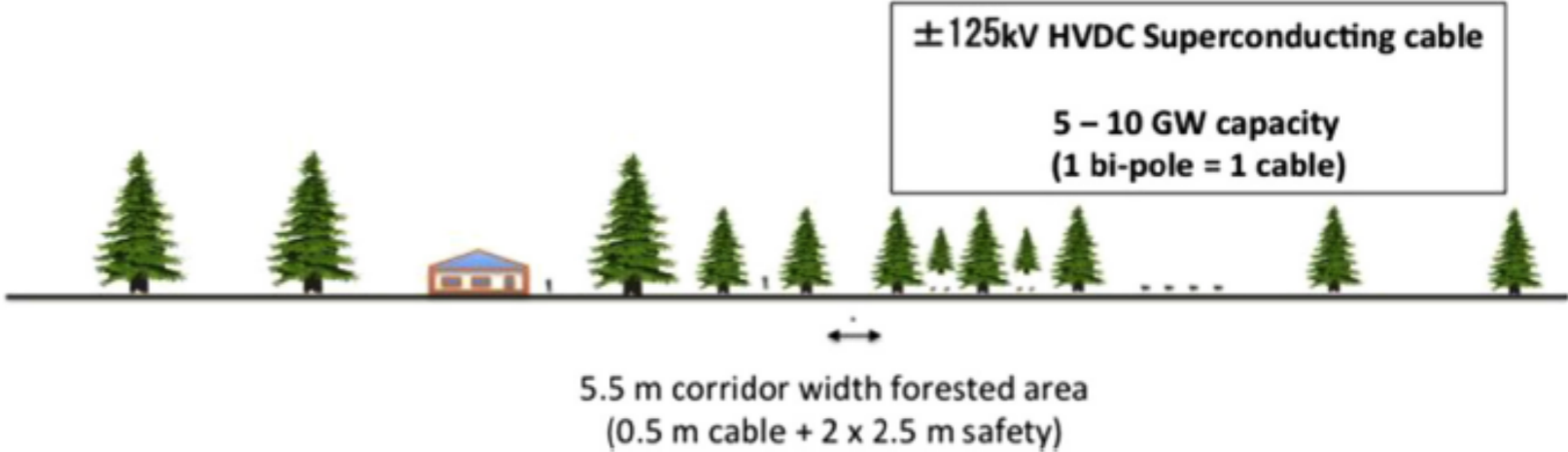
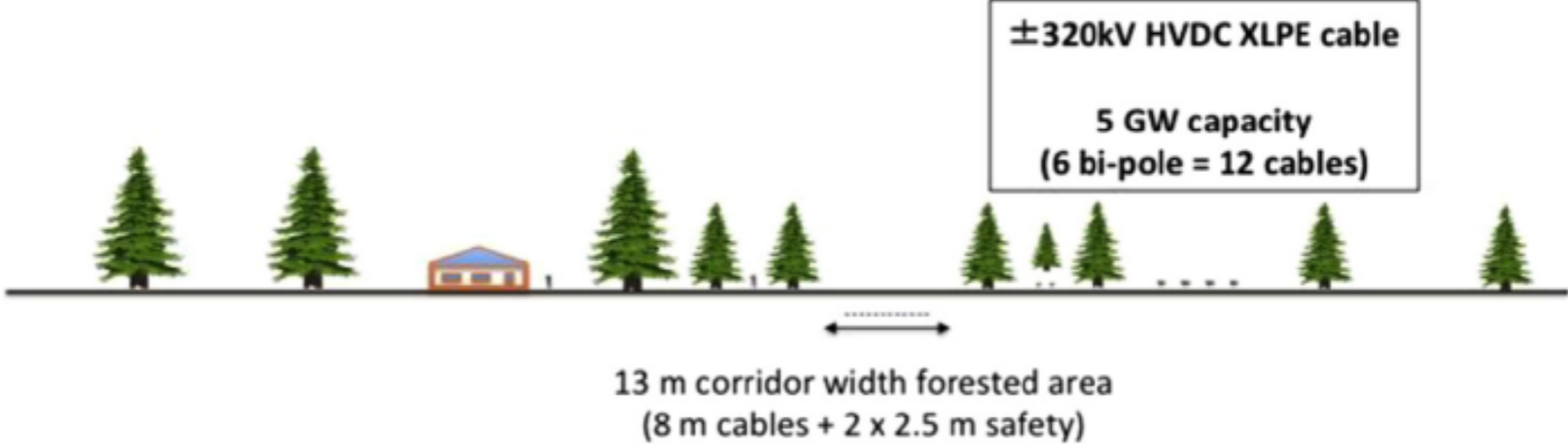
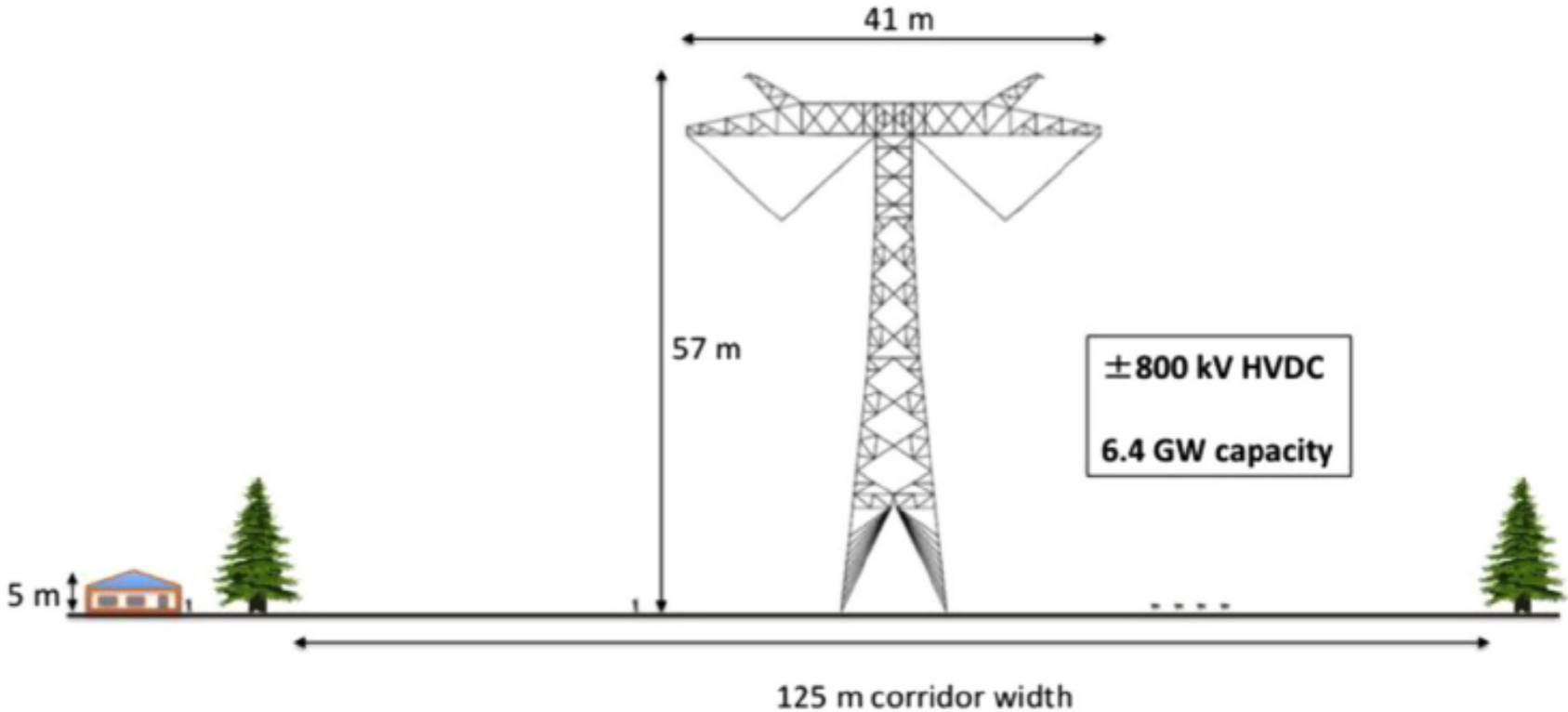
# Le applicazioni

- Sistema elettrico
  - Linee di trasporto della energia elettrica
  - Limitatori della corrente corrente di guasto
  - Sistemi di accumulo della energia (SMES)
  - Trasformatori, motori, generatori
- Applicazioni biomediche
  - Risonanza magnetica, spettroscopia
  - SQUID
- Ingegneria nucleare e fisica delle particelle
  - Fusione termo-nucleare controllata
  - Acceleratori di particelle
- Alti campi

# Trasporto della energia elettrica

- **Elevato valore della potenza trasmissibile** (Potenza trasmissibile doppia rispetto ai cavi isolati a gas e 4-10 volte superiore rispetto ai cavi con isolante solido attualmente installati)
- **Compattezza** (a parità di potenza elettrica trasmessa)
- **Ridotto valore della tensione di trasmissione** (è possibile pensare a sistemi che non utilizzano trasformatori elevatori)
- **Elevata compatibilità ambientale** (cavi interrati)
- **Perdite elettriche ridotte** (riduzione delle perdite di circa il 40% in alternata, e ancora maggiori in continua, ma bisogna tenere conto della potenza per la refrigerazione)
- **Problemi : costo ed affidabilità**

# Cavi Superconduttori



# Trasporto della energia elettrica

Possibili applicazioni delle linee di trasporto superconduttive:

- Rinforzo di linee esistenti per incremento della potenza
- Posizionamento ottimizzato di una sottostazione di trasformazione
- Sostituzione di cavi già esistenti
- Sostituzione di linee aeree
- Collegamento di aree debolmente connesse
- Eliminazione di un livello di tensione
- Connessione di centrali eoliche e/o fotovoltaiche alla rete di trasporto
- Trasporto di grandissime potenze a grandi distanze

## *Progetti sui cavi superconduttori*

- Progetto LIPA (Long Island Power Authority), in servizio nel 2008 all'interno della stazione di Holbrook a Long Island (New York, USA): primo collegamento al mondo in alta tensione (138 kV, 574 MVA, 610 m, BSCCO (LIPA-I), YBCO (LIPA-II))
- Progetto HYDRA: collegamento fra due sottostazioni urbane della città di New York in posizione di busbar-coupling (13.8 kV, 95 MVA, 170 m, YBCO), in servizio nel 2014.
- Progetto AMPACITY: collegamento di due sottostazioni urbane appartenenti alla utility RWE all'interno della città di ESSEN (Germania) (10 kV, 40 MVA, 1 km) in servizio nel 2013; il progetto prevede anche la sperimentazione di un FCL.
- KEPCO (Korea Electric Power COrporation) ha installato nella sottostazione Icheon un cavo a base di YBCO (22.9 kV, 50 MVA, 400 m) che è in servizio a partire dal 2011.
- KEPCO ha inoltre installato nel 2014, nell'isola di Jeju (Corea del Sud) un cavo DC (80 kV, 500 MW, 500 m) e sulla stessa isola è in fase di installazione un cavo AC a base di YBCO (154 kV, 600 MVA, 1km)
- Progetto YOKOHAMA; installato nel 2012 nella sottostazione Asahi (Yokohama, Giappone) della rete di distribuzione della utility TEPCO (Tokyo Electric Power Company) un cavo AC (66 kV, 200 MVA, 240 m) che ha terminato con successo la sperimentazione nel 2014.



# Limitatori superconduttivi della corrente di guasto (SFCL)

Il corto circuito in una rete elettrica è un evento “certo” che produce grandi malfunzionamenti della rete elettrica

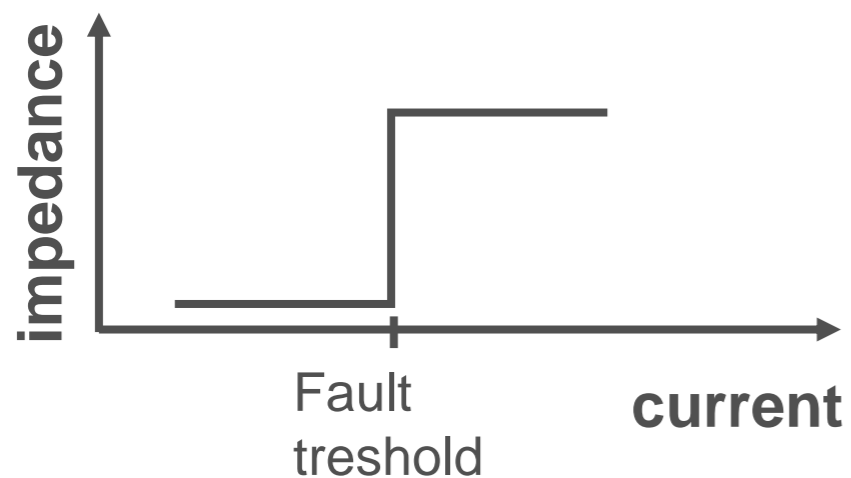


## Provvedimenti tradizionali

- Reattanze in aria
- Sezionamento delle reti
- Trasformatori ad alta reattanza interna
- Sovradimensionamento dei componenti

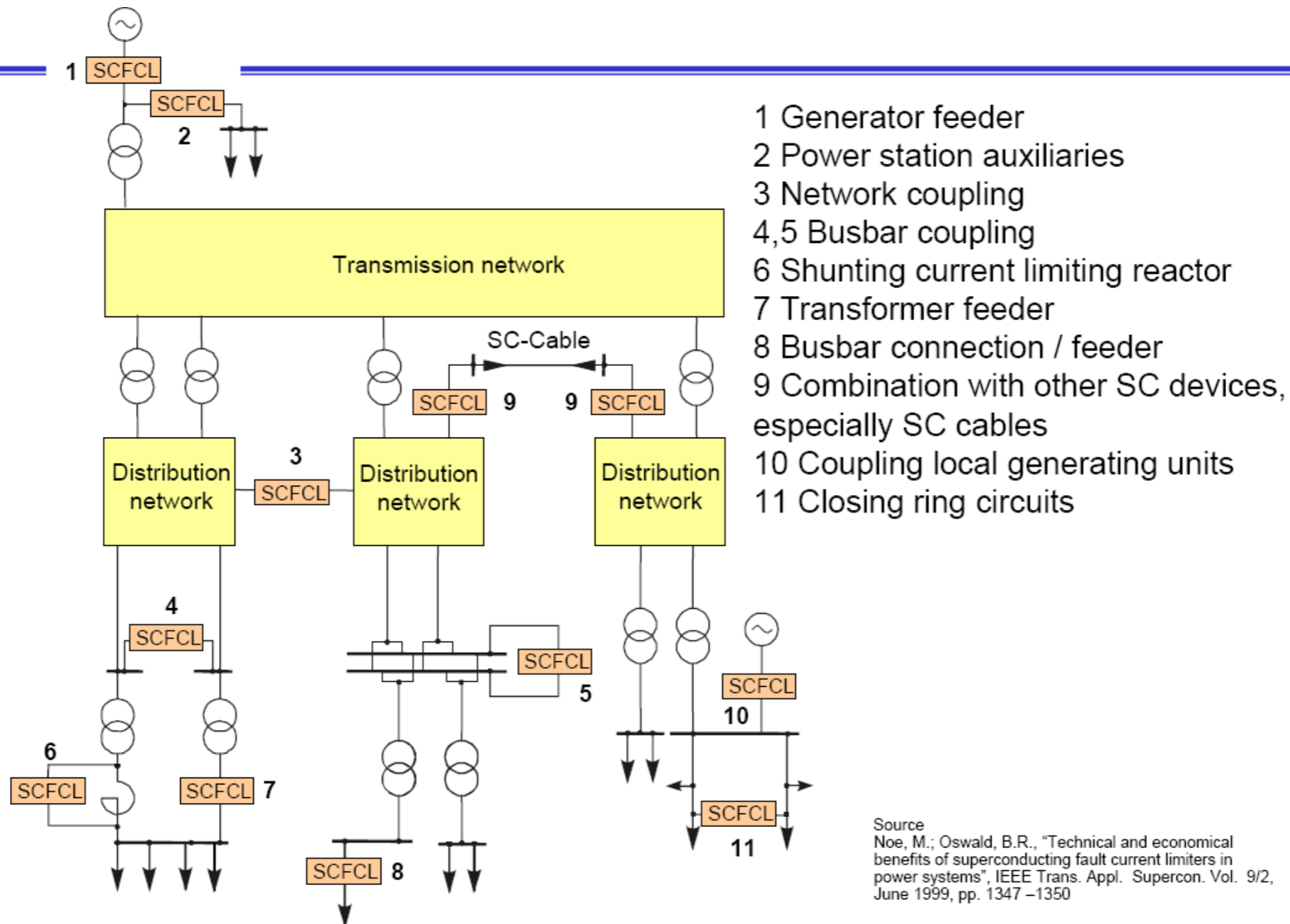
**Tutti questi provvedimenti impediscono l'esercizio efficace della rete, peggiorano la Power Quality e comportano costi elevati**

**Una possibile soluzione è un Fault Current Limiter (FCL)**

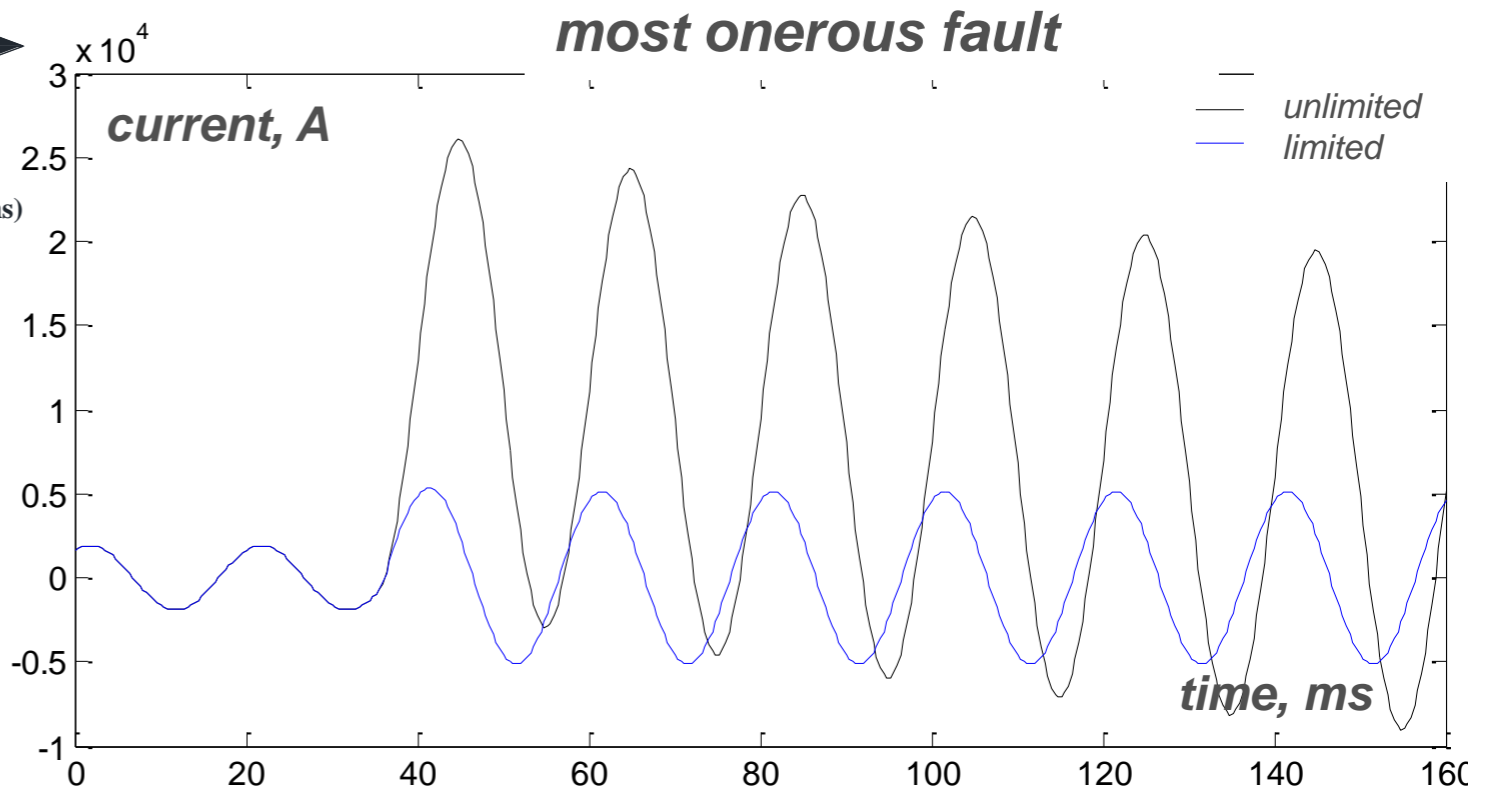
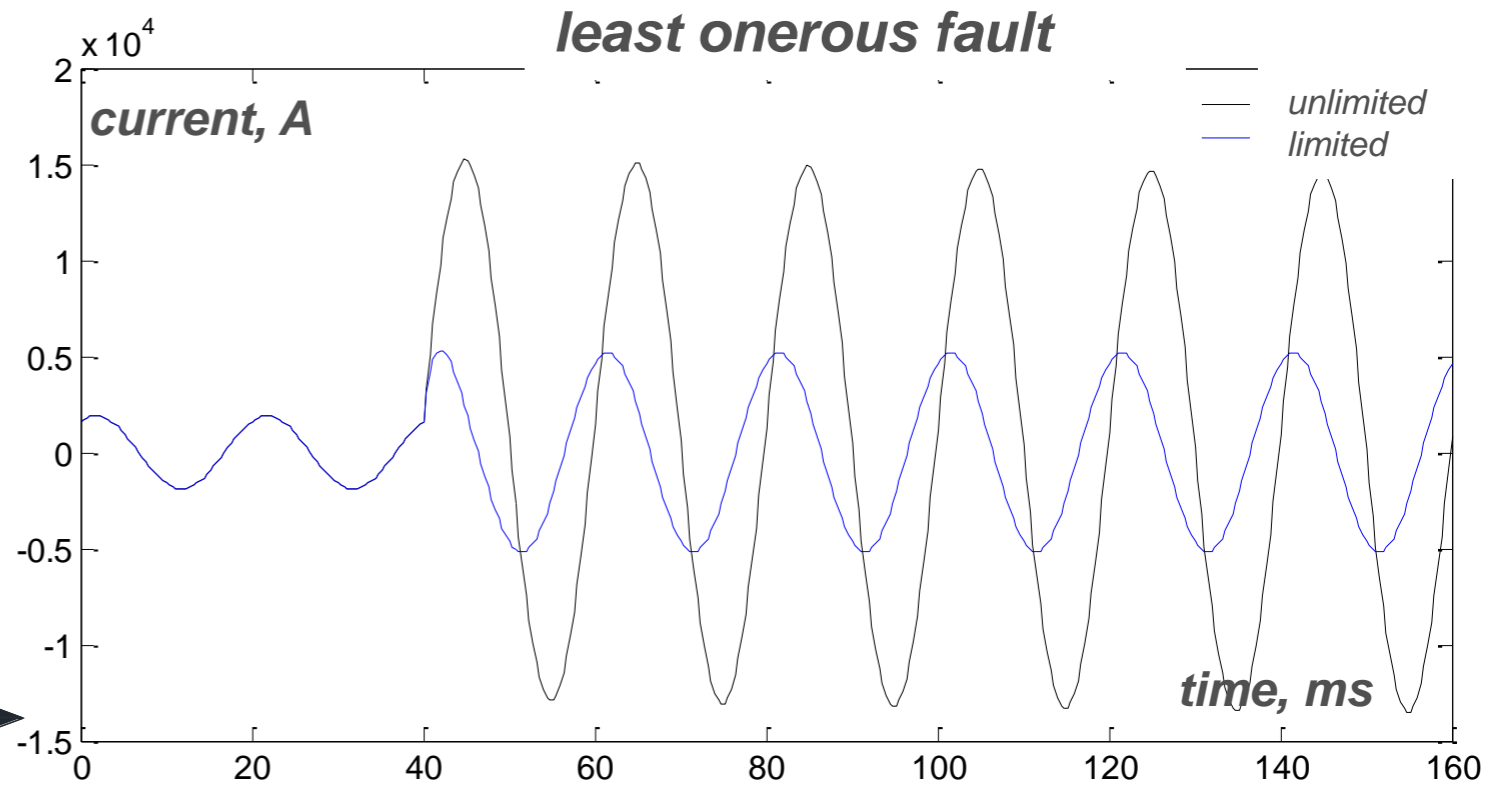
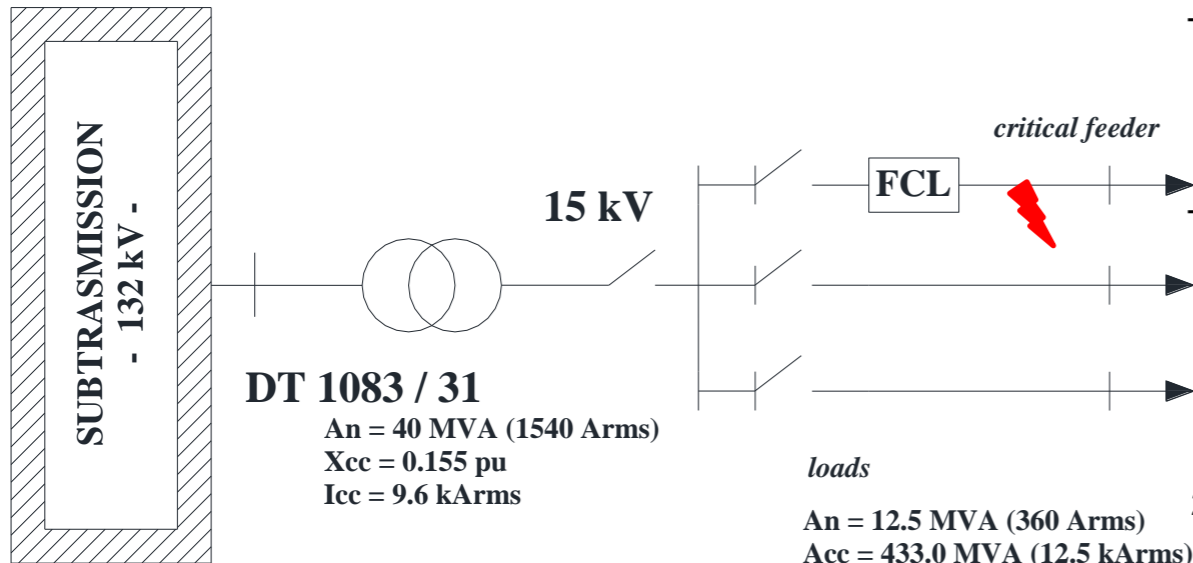


Il FCL presenta una impedenza trascurabile nelle normali condizioni di funzionamento ed è capace di transire ad un valore elevato di impedenza in caso di un guasto che produca una sovracorrente

# Possibili applicazioni degli SFCL nelle reti di trasmissione e distribuzione



# Esempio di Intervento di un FCL



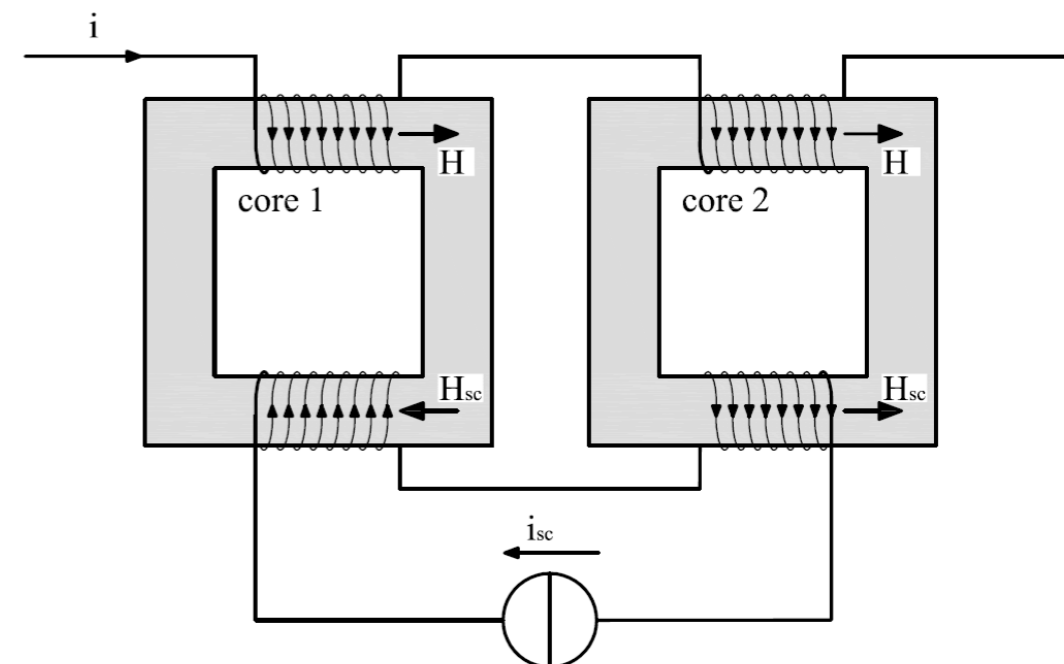
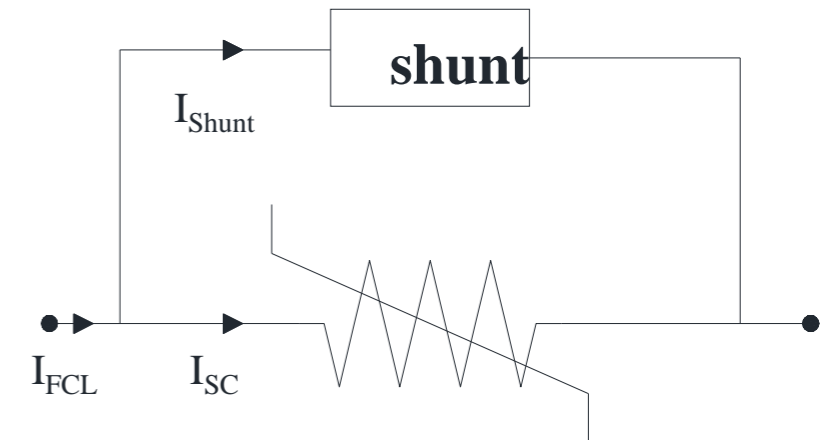
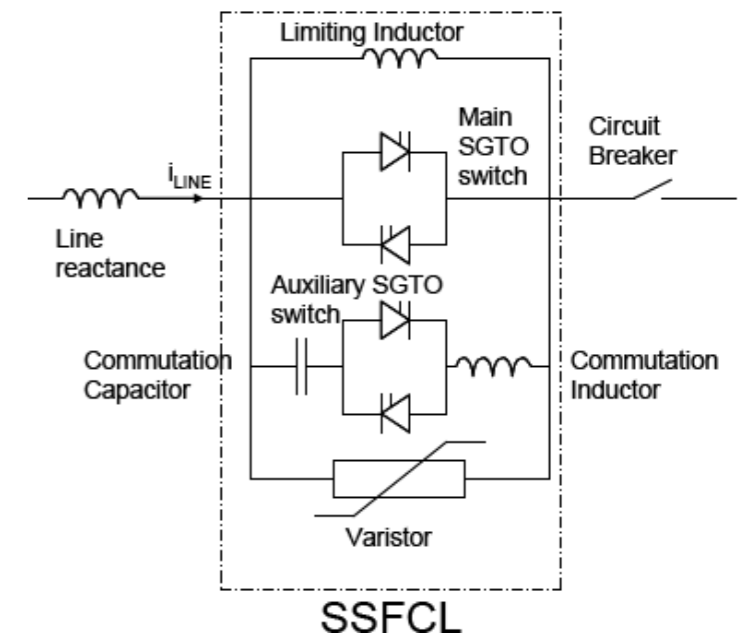
# Tecnologie per FCL

## Tecnologie convenzionali:

- FCL pirotecnici; disponibili fino dal 1955
- FCL a stato solido

## Tecnologia superconduttiva:

- Resistivo; **reattanza nulla** (avvogimento anti-induttivo), **compatto**, **perdite ac**, **sviluppo di quench** (lungo tempo di recupero)
- Induttivo; piccola reattanza (il nucleo magnetico è saturato), **nessuna perdita ac**, **non si sviluppa quench**, **ingombro**



# Progetti sugli SFCL

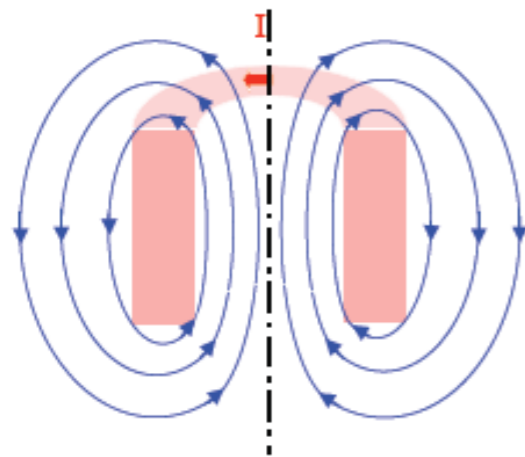
- RSE SpA (Ricerca sul Sistema Energetico) ha sviluppato un SFCL trifase di tipo resistivo (9 kV, 3.4 MVA) a base di BSCCO che è stato installato nel 2012 nella rete di distribuzione di Milano presso la sottostazione Dionigi di A2A Reti Elettriche SpA. Dopo due anni di regolare funzionamento senza necessità di interventi è stato realizzato un un corto circuito ad hoc della durata di 70 ms in cui il SFCL ha operato correttamente limitando il primo picco della corrente di guasto da un valore previsto di 20.84 kA ad un valore misurato di 11.87 kA. E' in fase di sviluppo un nuovo SFCL (9 kV, 15 MVA) da installare nella stessa sottostazione.
- Progetto ECCOFLOW: progetto europeo avviato nel 2010 che ha sviluppato un SFCL di tipo resistivo (24 kV, 1 kA) a base di YBCO. Il dispositivo è stato testato in laboratorio e verrà quindi testato prima presso la sottostazione San Juan de Dios (Palma di Maiorca, Spagna) con funzione di busbar coupling e quindi verrà installato presso la sottostazione di ES Jub (Kosice, Slovacchia).
- Progetto AMPACITY: in serie al cavo SAT è stato installato nel 2014 un SFCL di tipo resistivo (10 kV, 40 MVA)
- Innopower Superconductor Cable Company (Beijing, Cina) ha installato nel 2012, nella sottostazione Shigezhuang (Tianjin, Cina) un SFCL a nucleo saturato, basato su BSCCO (220 kV, 300 MVA); primo dispositivo concepito per applicazioni in AT.
- KEPCO (Korean Electric Power Corporate) ha installato nel 2011, presso la stazione Icheon (Icheon, Corea del Sud) , un SFCL di tipo resistivo (29 kV, 630 A) e sta realizzando un SFCL da installare sempre nella stessa stazione ma sulla rete AT.

# Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

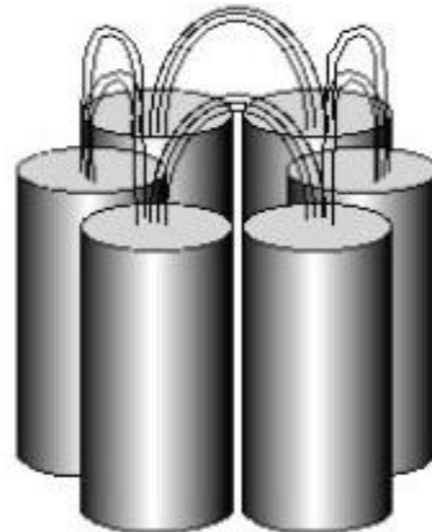
L'energia elettrica può essere accumulata in un campo magnetico:  $E = \iiint \frac{B^2}{2\mu_0} dV$

La densità volumetrica di energia è piccola: 0.4 MJ/m<sup>3</sup> (B=1T), 9.9 MJ/m<sup>3</sup> (B=5T), 39.8 MJ/m<sup>3</sup> (B=10T), 159 MJ/m<sup>3</sup> (B=20T) (1000 MJ/m<sup>3</sup> per una batteria litio/ioni)

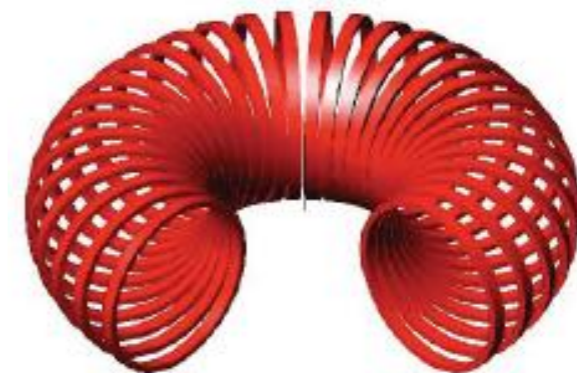
Il campo magnetico viene prodotto dalla corrente che circola in un avvolgimento



solenoid



Gruppo di solenoidi

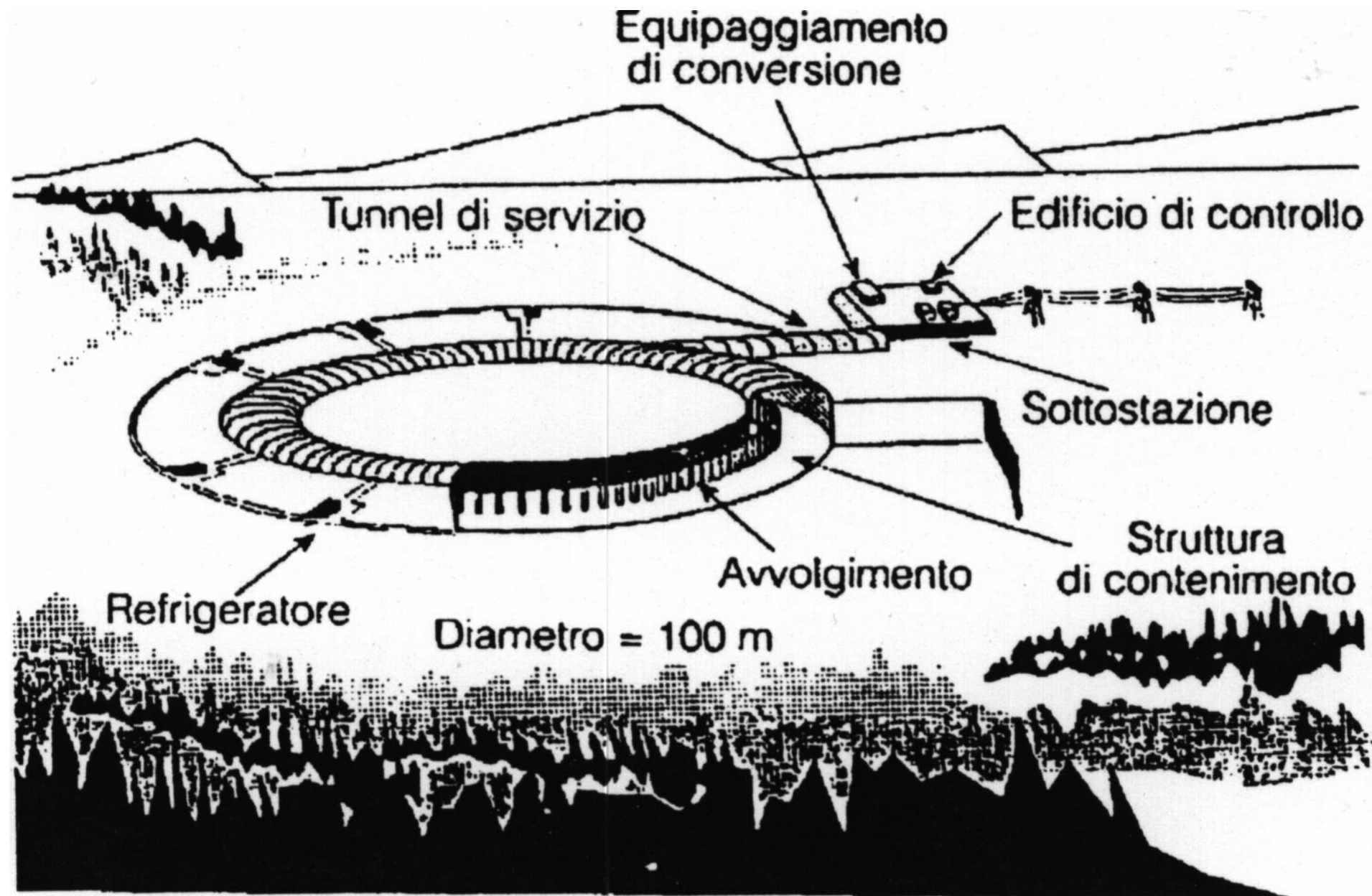


Avvolgimento toroidale

Se l'avvolgimento è resistivo la potenza dissipata per effetto Joule rende impossibile la realizzazione pratica del sistema di accumulo. Utilizzando un materiale superconduttore, una volta caricato l'avvolgimento, non esistono perdite nell'avvolgimento in quanto funziona in corrente continua.

## SMES - 2

Inizialmente si è pensato a sistemi di dimensioni molto grandi, che richiedono particolari strutture di contenimento dell'avvolgimento a causa del valore elevato delle forze.

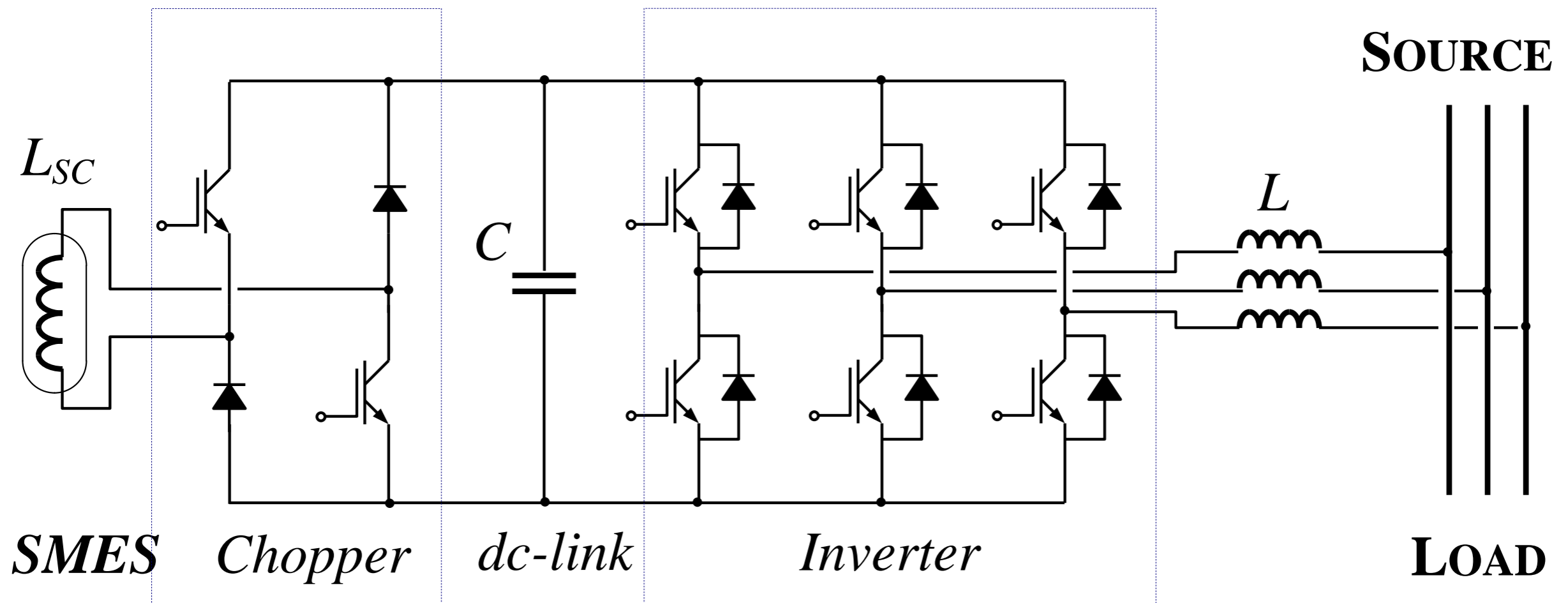


## SMES -3

Attualmente si studiano e realizzano sistemi di piccole dimensioni per:

- Funzioni di filtro attivo
  - Compensazione delle correnti armoniche del carico
  - Compensazione della potenza reattiva e dello sbilanciamento di carico
  - Smorzamento dei transitori di inserzione e di distacco dei carichi e dei generatori
- Funzioni di UPS (Uninterruptible Power Supply)
  - Alimentazione di back-up durante il guasto di rete
  - Funzioni di riserva di energia per i picchi di domanda in una rete elettrica

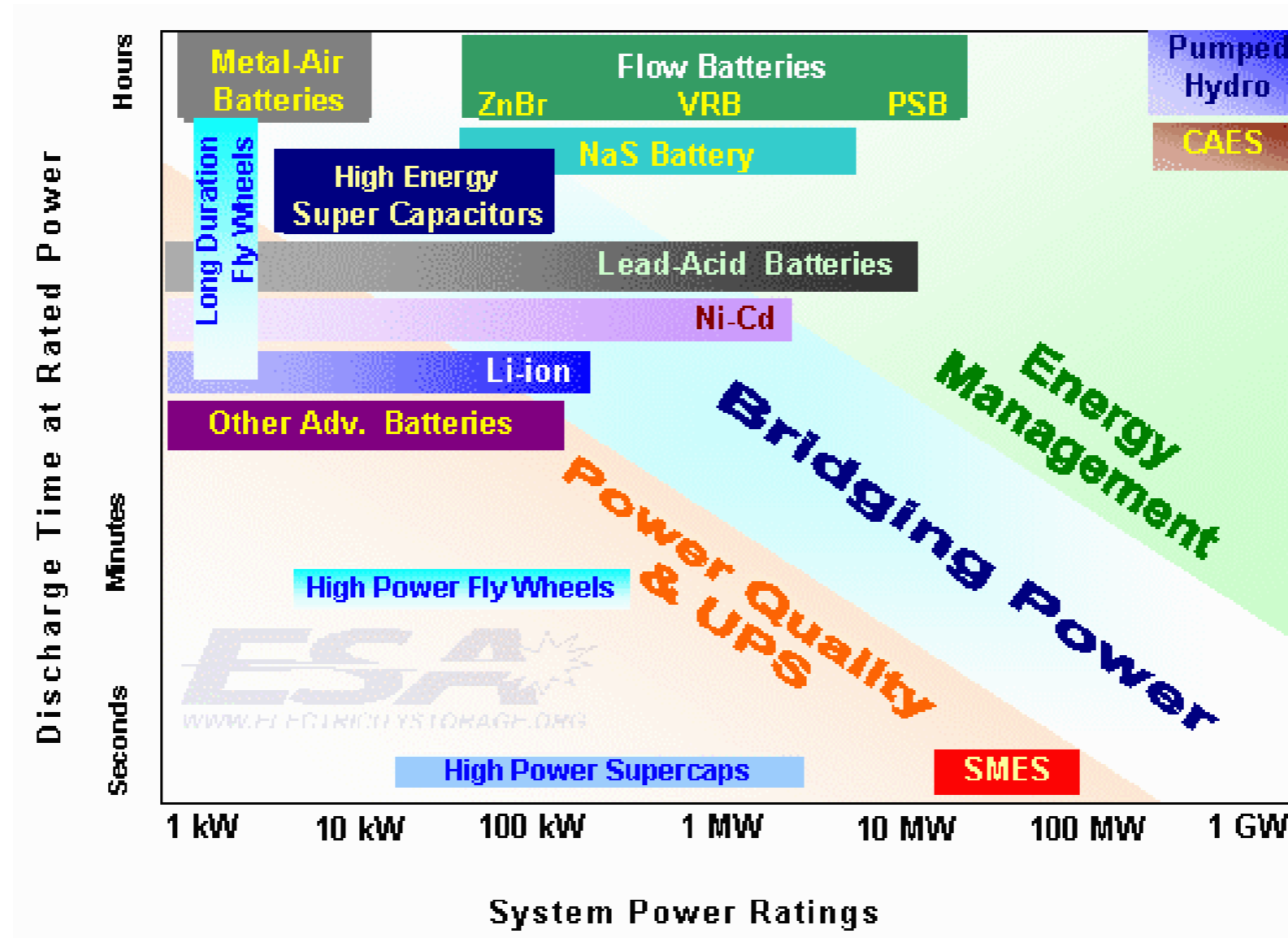
Uno dei principali problemi è l'energia dissipata nel chopper durante la fase di standby





# SMES - 4

Il sistema che attualmente sembra più interessante è un sistema ibrido costituito da un sistema di accumulo tradizionale con un sistema SMES realizzato con materiali HTS o  $MgB_2$ . Il sistema tradizionale è in grado di gestire la richiesta di grandi quantità di energia (energy intensive), mentre il sistema SMES è in grado di gestire la richiesta di grandi quantità di potenza (power intensive)

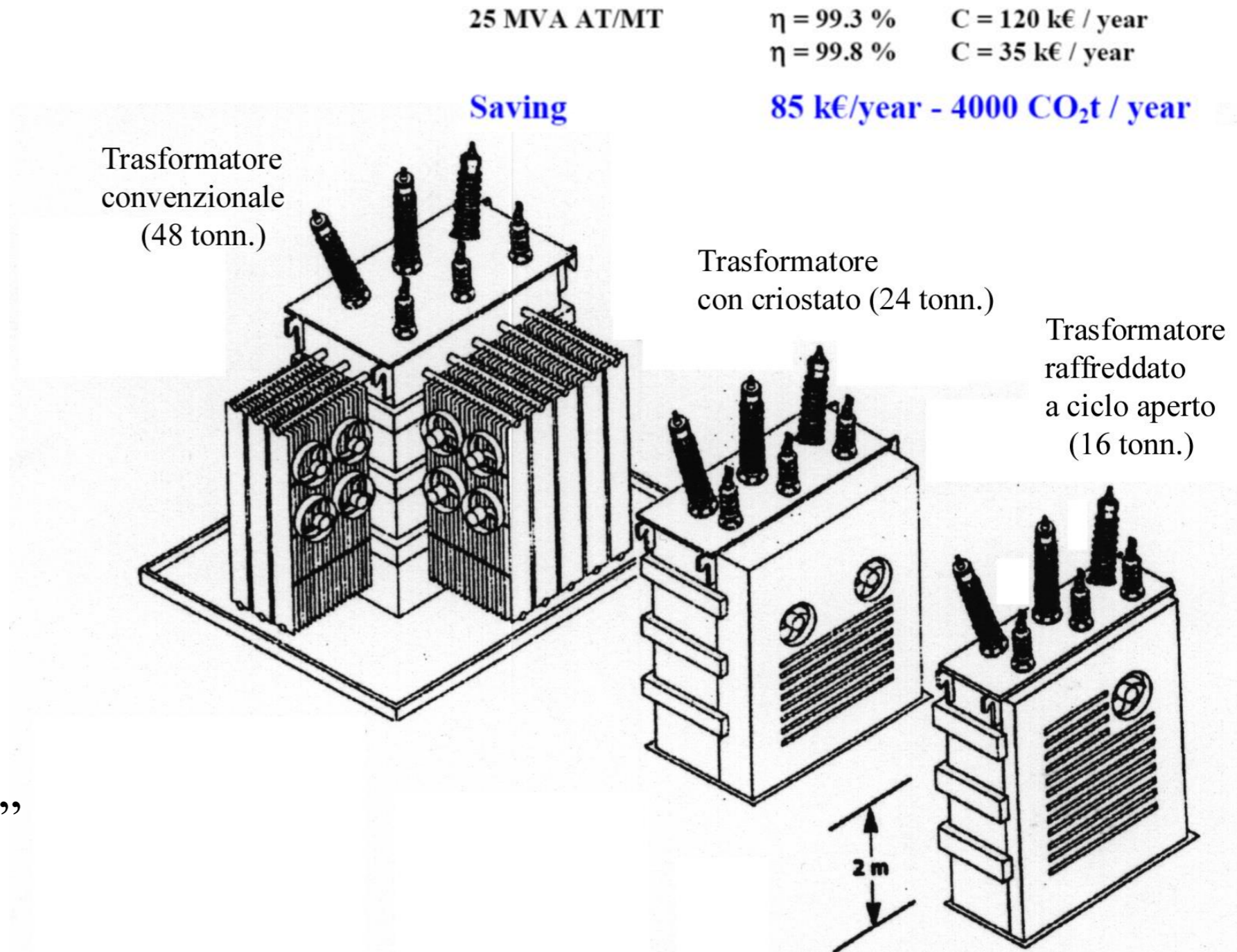


Source: Energy Storage Association

# Trasformatori - 1

- Nei trasformatori viene persa una parte consistente ( $\approx 25\%$ ) della energia dissipata in un sistema di trasporto e distribuzione della energia elettrica. I trasformatori superconduttivi realizzati con HTSC possono ridurre notevolmente la potenza dissipata.

- Hanno dimensioni ridotte.
- Possono funzionare a livelli di potenza notevolmente superiori alla potenza nominale ( $\approx 100\%$ ) per lunghi periodi ( $\approx$ ore) senza subire alcun danno.
- Possono svolgere funzioni di “limitatore della corrente di guasto”
- Non contengono olio

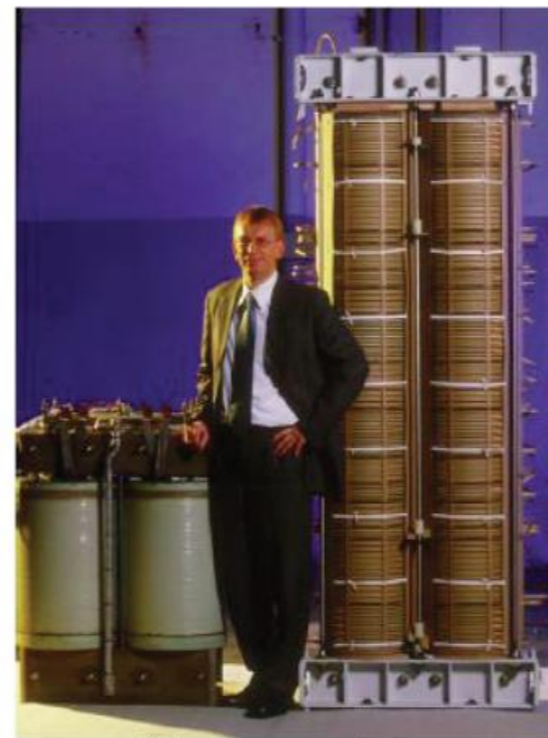


## Trasformatori - 2

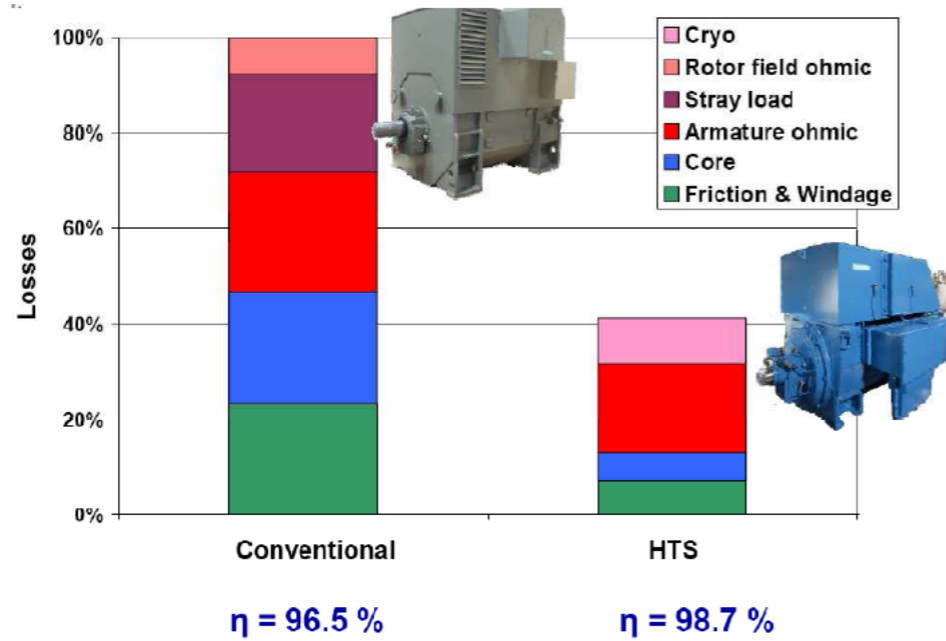
- ABB ha testato per un anno con successo in una stazione svizzera un trasformatore trifase (630 kVA) realizzato con nastro di Bi-2223/Ag
- Siemens ha sviluppato e testato con successo un dimostrativo di trasformatore (1 MVA) per applicazioni ferroviarie
- Negli Stati Uniti è in fase di sperimentazione, nella sottostazione MacArthur (Irvine, California) un trasformatore trifase (69/12.47 kV, 28 MVA) con anche funzioni di limitazione della corrente di guasto, realizzato con nastro YBCO

### SIEMENS

Total	1010 kg
▪ Core	655 kg
▪ Leakage Fe	140 kg
▪ HTS	54 kg
▪ LN <sub>2</sub> tank	272 kg

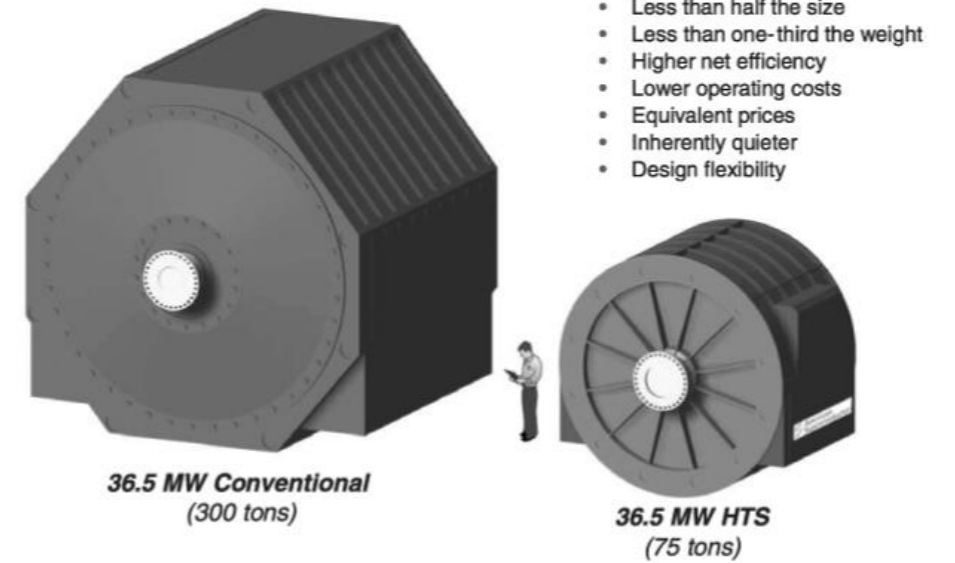


# Motori/Generatori superconduttivi

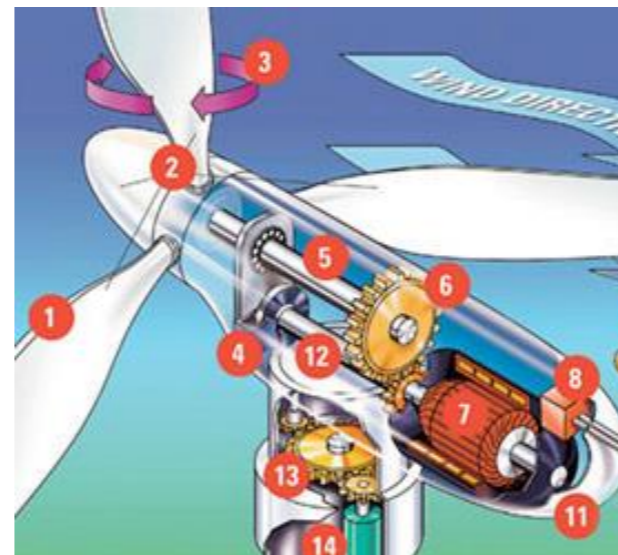


► Elevata efficienza

HTS Ship Propulsion Motors



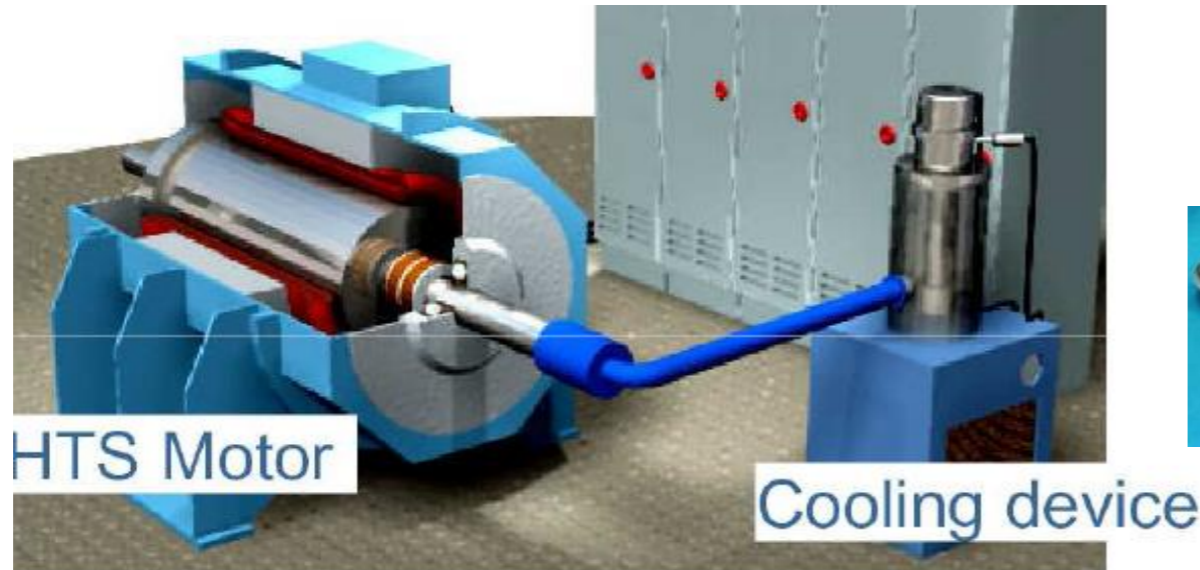
► Elevata densità di potenza  
in peso e volume ⇒ trasporti  
⇒ eolico off-shore



Elevata coppia a basso numero di giri  
eliminazione riduttore

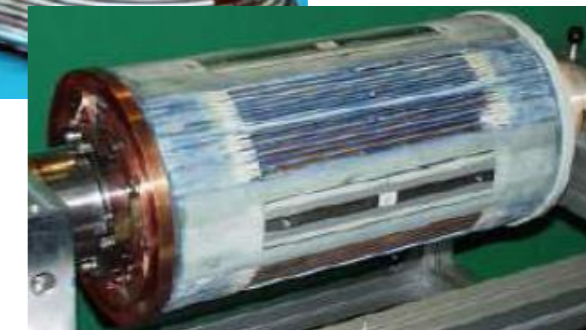
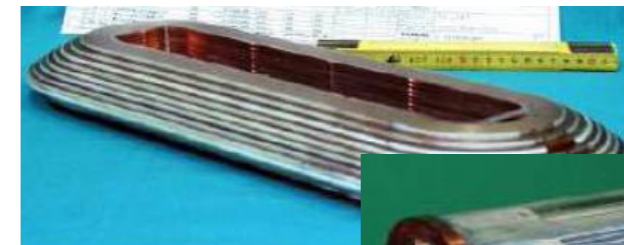
# Prototipi: applicazioni navali - 1

## SIEMENS 400 kW HTS Motor



**SC rotor – rotating cryostat**

Bi-2223/Ag @ 25-30K



## SIEMENS 4MW HTS generator



**Sperimentazione in corso**

## SUMITOMO ELECTRIC



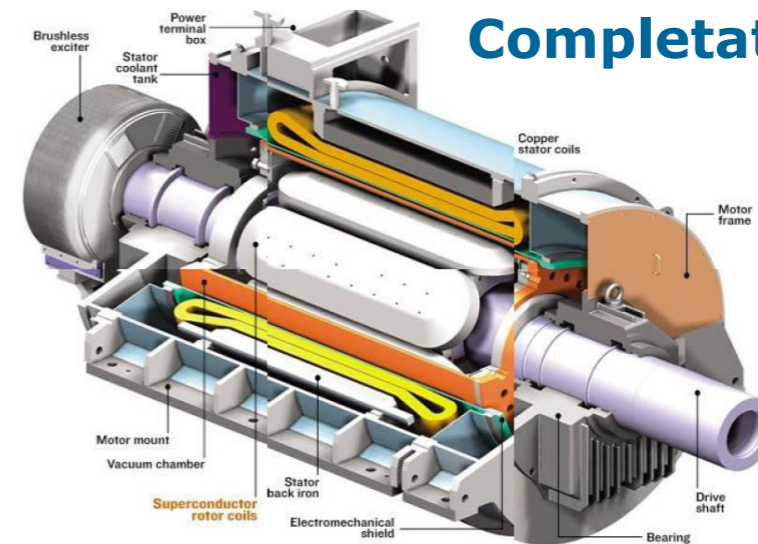
**12.5 kW  
100 rpm**

**2005**

▲ Pod propulsion system with HTS motor

# Prototipi: applicazioni navali - 2

## 5 MW HTS Ship Propulsion Motor



Completato nel 2003

## 36.5 MW HTS Ship Propulsion Motor

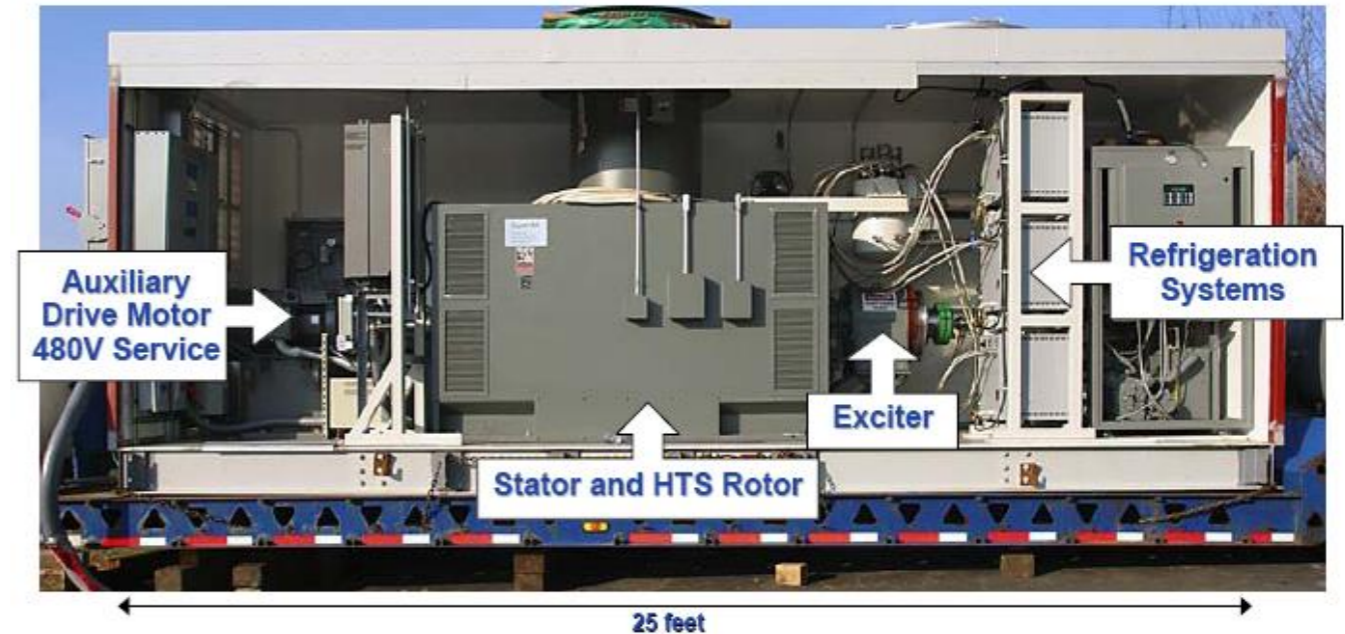


Completato nel 2007

# Prototipi: FACTS



## SuperVAR Condenser



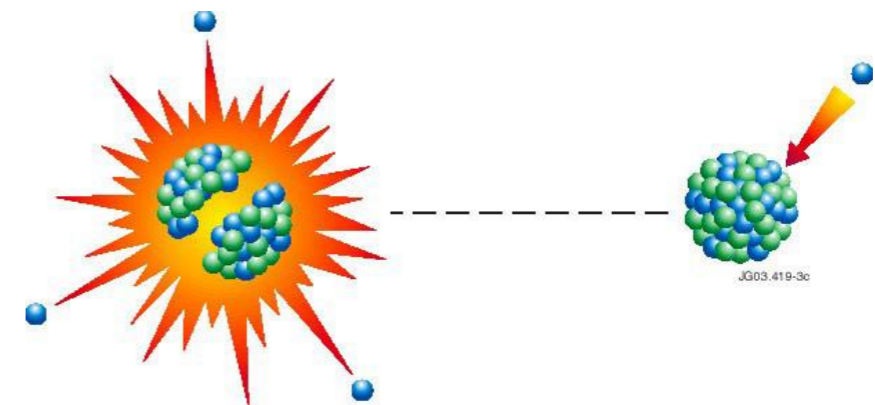
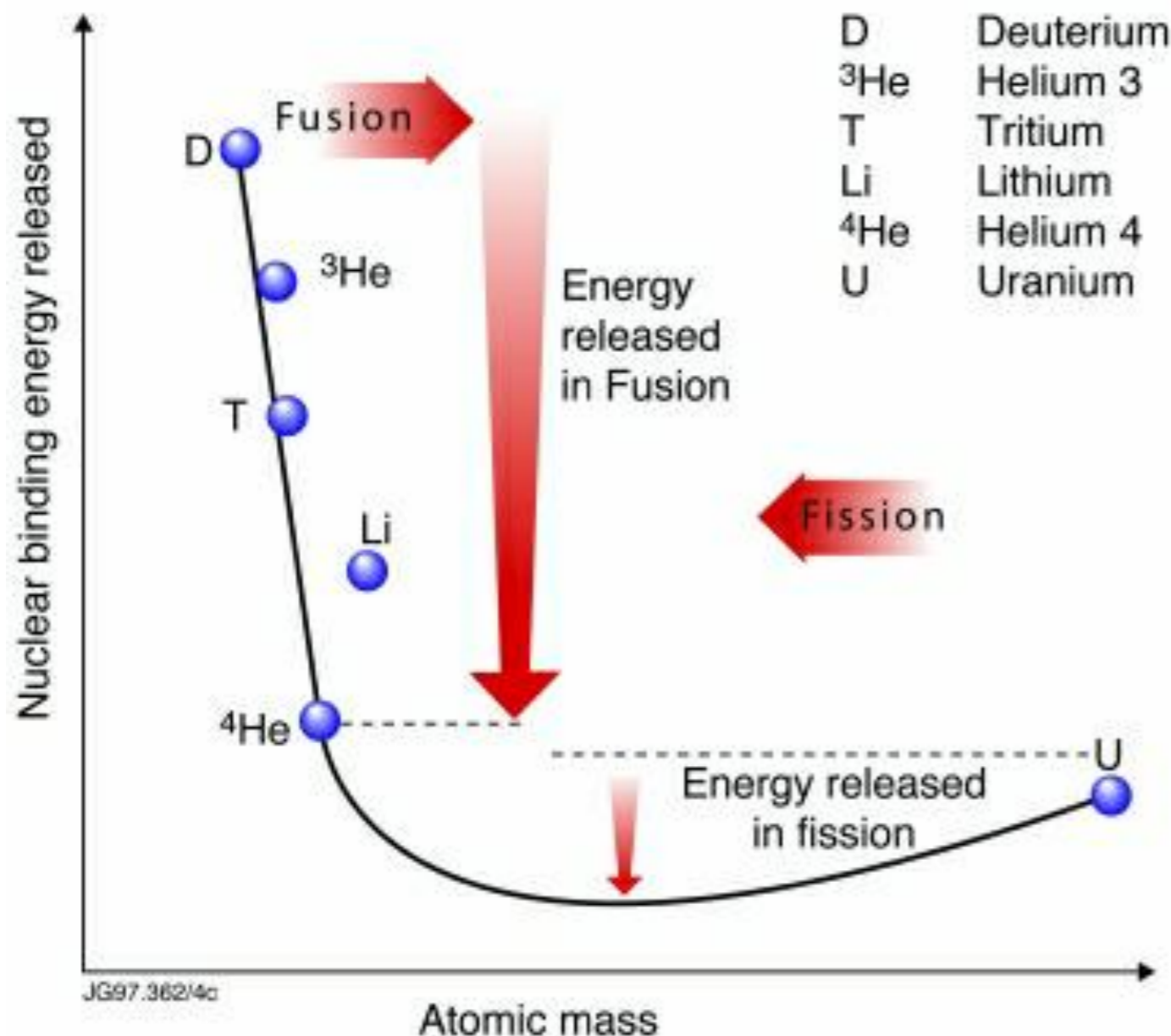
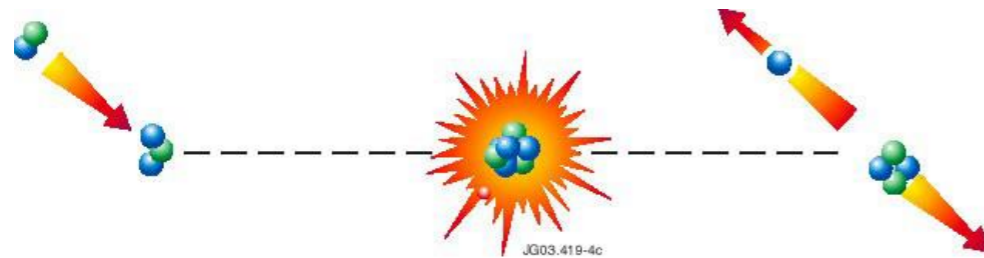
Rating	8 MVAR
Voltage	13.8 kV line to line
Ambient Temp	-30° to +40°C
Losses	1.7% rating at 8MVA
	Including 50kW 480V auxiliary power



## Reactive Power Control and Voltage Stability

# Produzione di Energia mediante reazioni nucleari di fissione e fusione

E' possibile produrre energia da reazioni nucleari sia mediante reazioni di fissione di nuclei pesanti (U) che di fusione di nuclei leggeri (D,T)

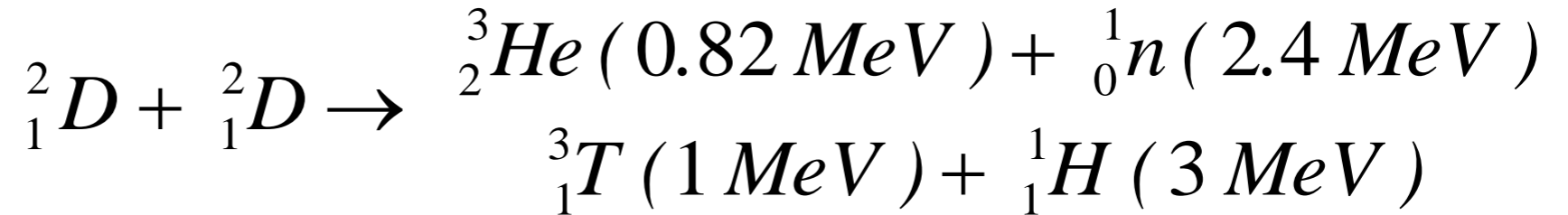


Le reazioni di fissione sono utilizzate nei moderni reattori nucleari commerciali e presentano il problema delle scorie radioattive.

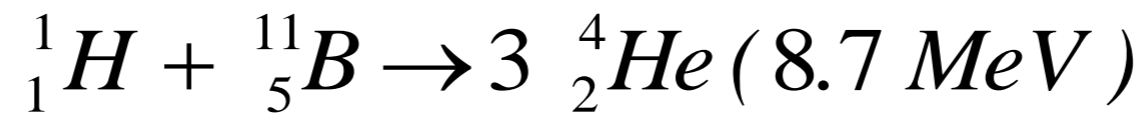


# Reazioni di fusione nucleare

Con emissione di neutroni (problemi legati all'attivazione dei materiali strutturali)

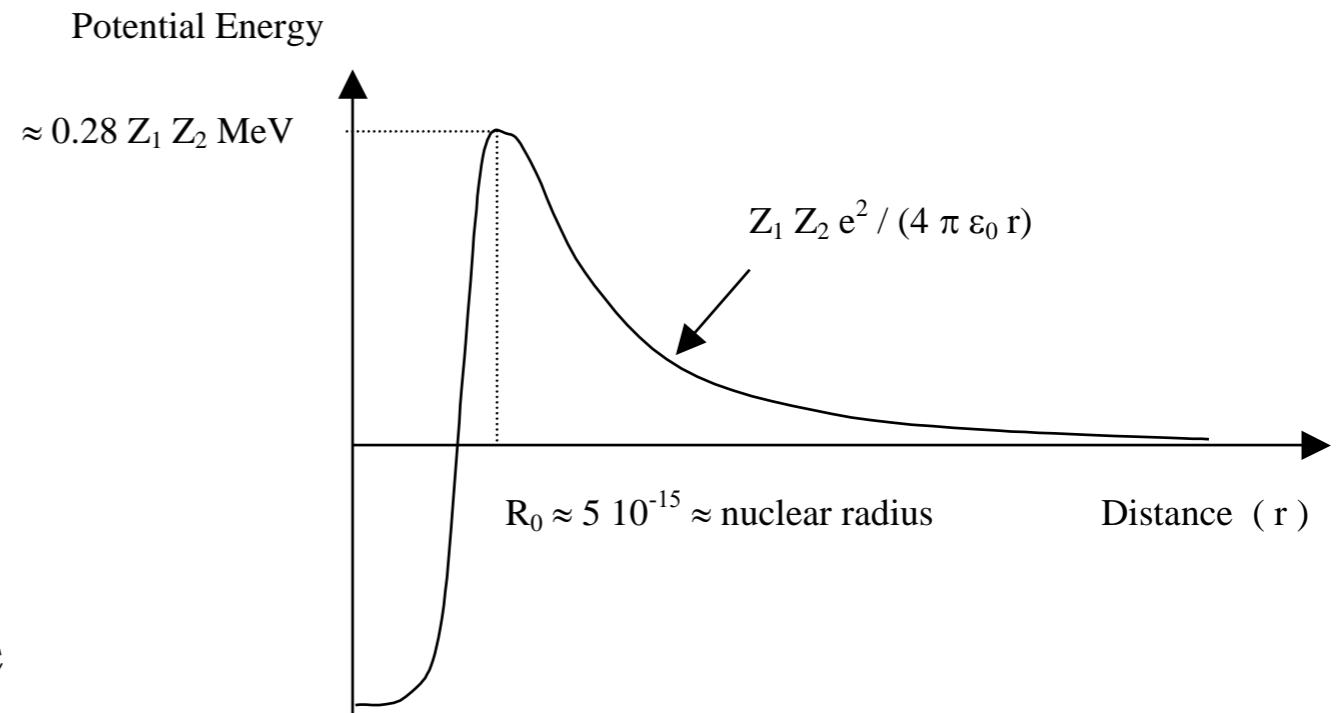


Senza emissione di neutroni



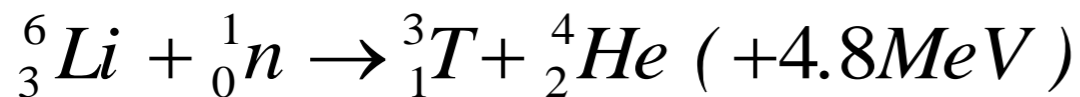
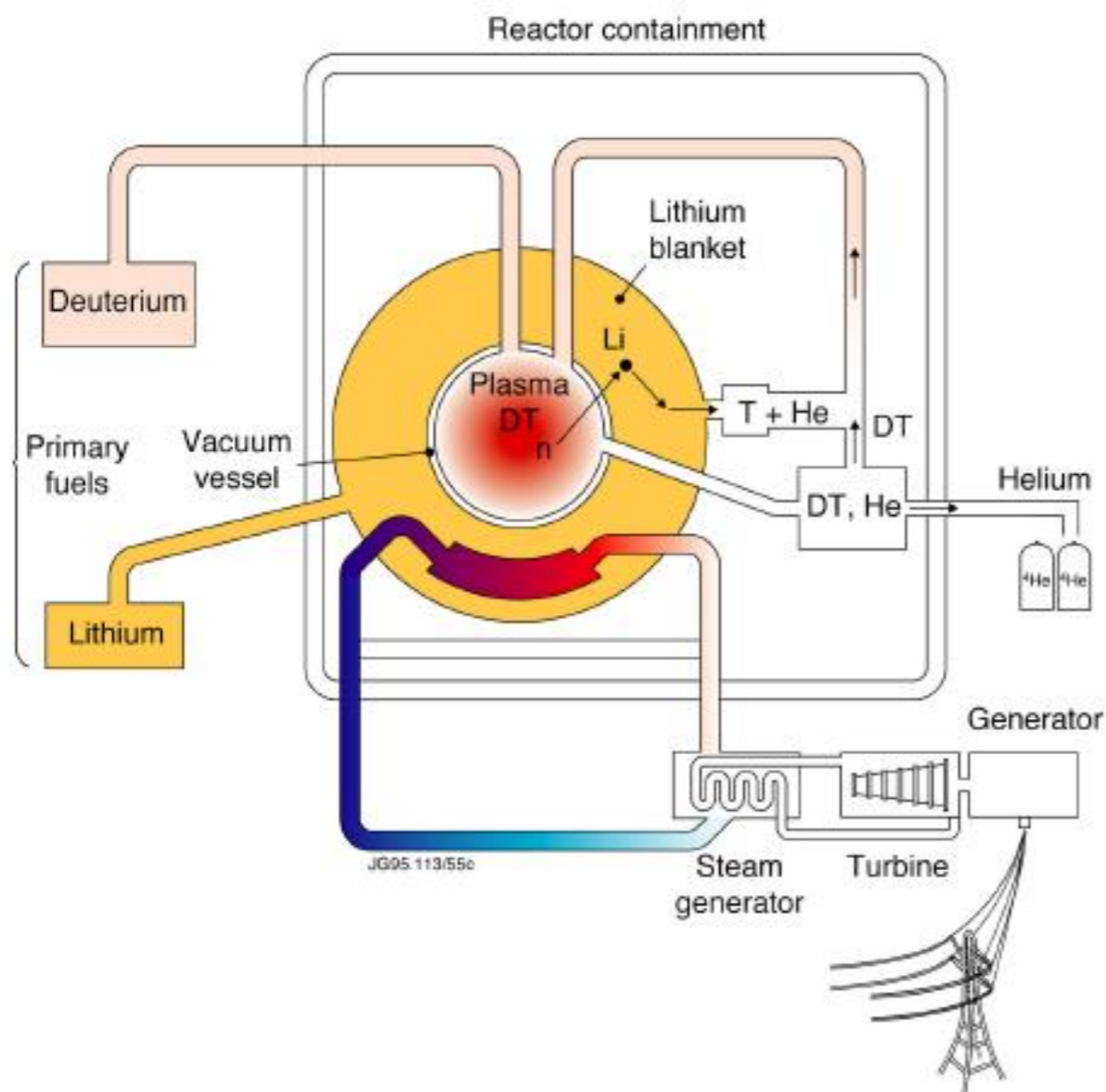
## Le reazioni di fusione non producono scorie radioattive

Per avvenire bisogna però riuscire ad avvicinare i due nuclei (D, T), entrambi carichi positivamente, vincendo la forza repulsiva di natura elettrica, fino ad una distanza sufficientemente piccola (dell'ordine delle dimensioni del nucleo) in modo che agiscano le forze di attrazione nucleare



# Reattore nucleare a fusione

- Si raggiunge l'ignizione quando l'energia prodotta dalle reazioni di fusione, trasportata dalle particelle cariche che rimangono intrappolate nel plasma, uguaglia l'energia termica ceduta per conduzione ed irraggiamento.
- All'ignizione l'energia trasportata dai neutroni, che non sono confinati nel plasma, assorbita nel mantello di litio, viene utilizzata per alimentare un normale ciclo a vapore per la produzione di energia elettrica.



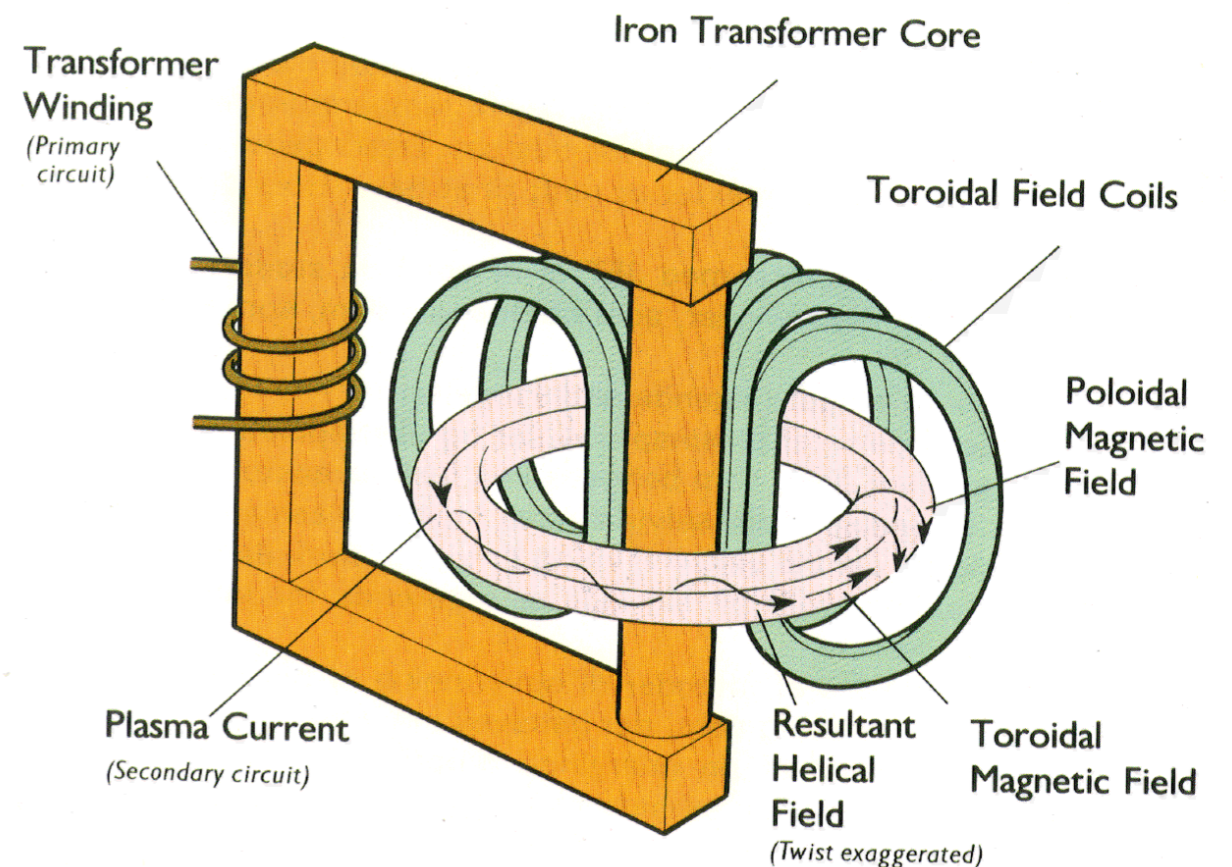
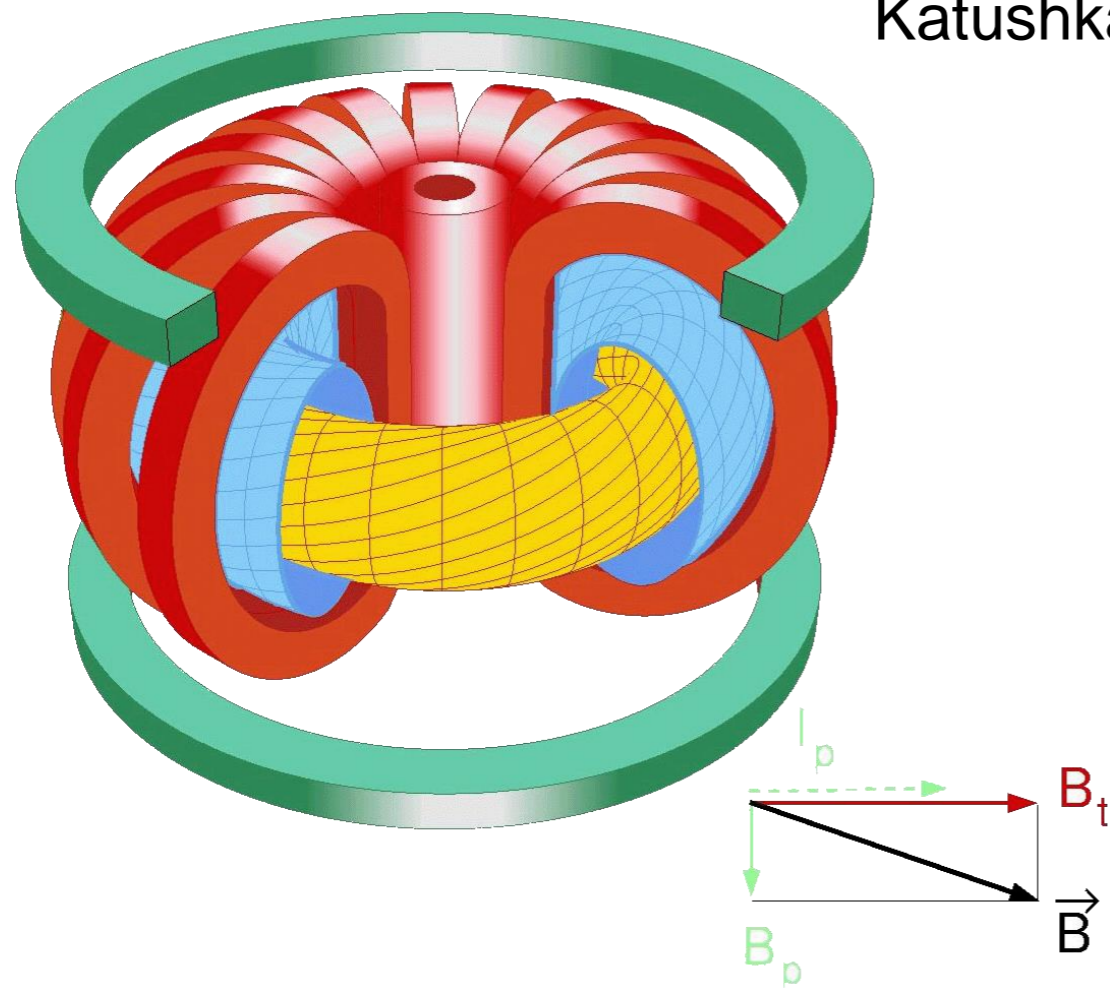
Il deuterio è un isotopo naturale dell'idrogeno (0.015 %), mentre il trizio è un isotopo radioattivo praticamente non presente in natura e che può essere generato dal litio

Il litio naturale è una miscela di litio-6 (7.4 %) and litio-7 (92.6 % )

## Reattore nucleare a fusione - 2

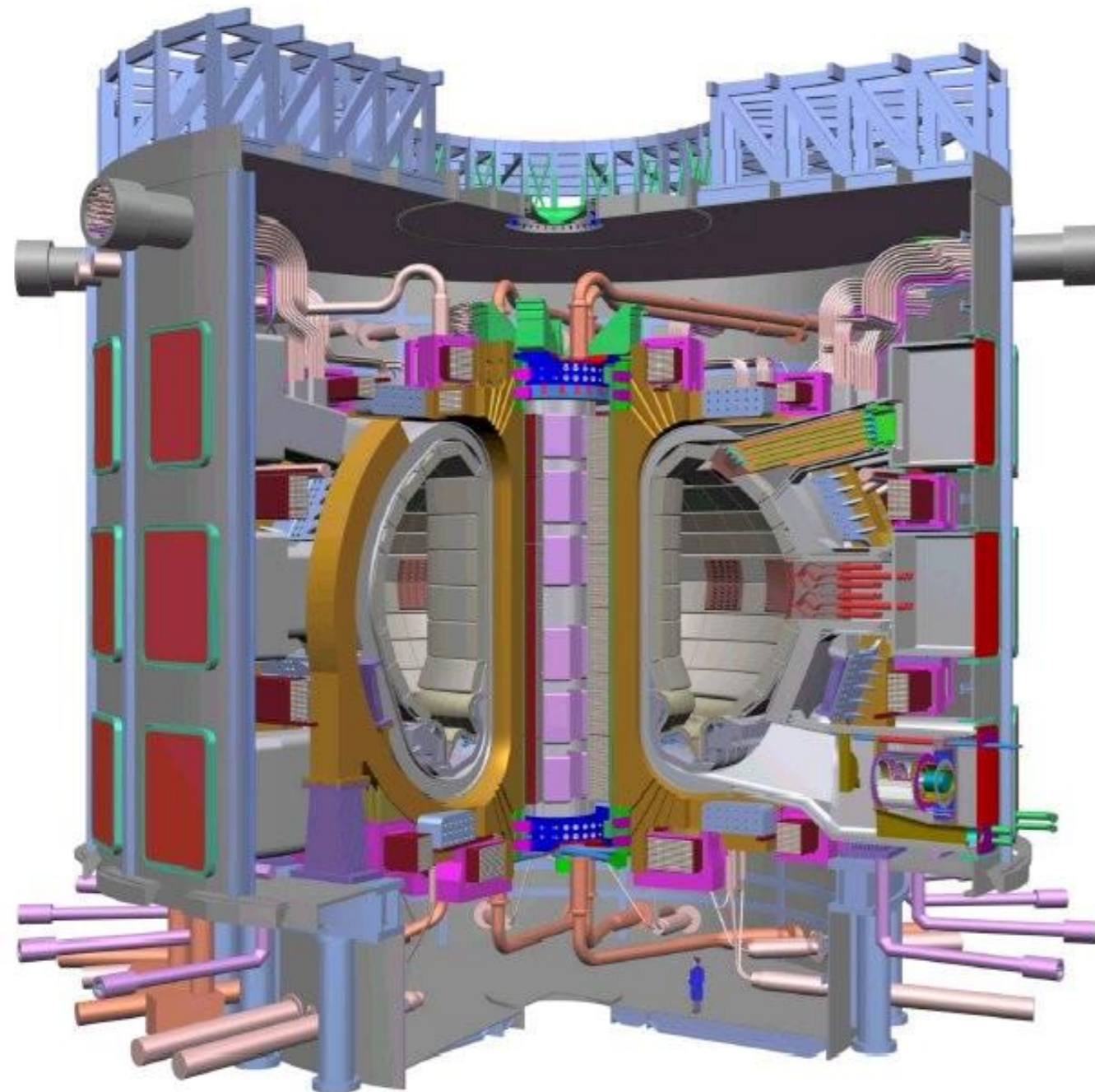
- E' possibile produrre reazioni di fusione nucleare riscaldando una miscela di D e T fino a temperature maggiori di  $1 \text{ keV} = 11\,600\,000 \text{ K}$
- E' necessario quindi confinare il plasma (il gas è completamente ionizzato) perchè non esistono materiali in grado di sopportare tali temperature.
- Una possibile tecnologia sfrutta l'interazione delle particelle cariche con un campo magnetico (confinamento magnetico)
- I magneti che producono il campo di confinamento (fino a 12 T debbono essere superconduttori altrimenti le perdite per effetto Joule sarebbero troppo elevate)

TOKAMAK (TOroidalnaya KAmera and MAgnitnaya Katushka (toroidal chamber and magnetic coil) )



# International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)

- Dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della produzione di energia elettrica per mezzo di una reazione termonucleare controllata



Fusion power : 500 MW

$Q \left( \frac{\text{Fusion energy}}{\text{Input energy}} \right) : 10$

Average neutronic flux : 0.57 MW/m<sup>2</sup>

Major radius : 6.2 m

Minor radius : 2.0 m

Plasma current : 15 MA

Magnetic flux density on axis : 5.3 T

Plasma volume (m<sup>3</sup>): 837 m<sup>3</sup>

## Members

China, European Union, India, Japan, Korea, Russia, United States

## Timeline

2005 Decision to site the project in France

2006 Signature of the ITER Agreement

2007 Formal creation of the ITER Organization

2007-2009 Land clearing and levelling

2010-2014 Ground support structure and seismic foundations for the Tokamak

2012 Nuclear licensing milestone: ITER becomes a Basic Nuclear Installation under French law

2014-2021\* Construction of the Tokamak Building (access for assembly activities in 2019)

2010-2021\* Construction of the ITER plant and auxiliary buildings for First Plasma

2008-2021\* Manufacturing of principal First Plasma components

2015-2021\* Largest components are transported along the ITER Itinerary

2018-2025\* Assembly phase I

2024-2025\* Integrated commissioning phase (commissioning by system starts several years earlier)

**Dec 2025\* First Plasma**

**2035\* Deuterium-Tritium Operation begins**