

核融合研究開発基本問題討論会(第19回)

平成16年2月24日(火)

中央合同庁舎第4号館 4階 共用第2特別会議室

# 超伝導線材の現状と展望

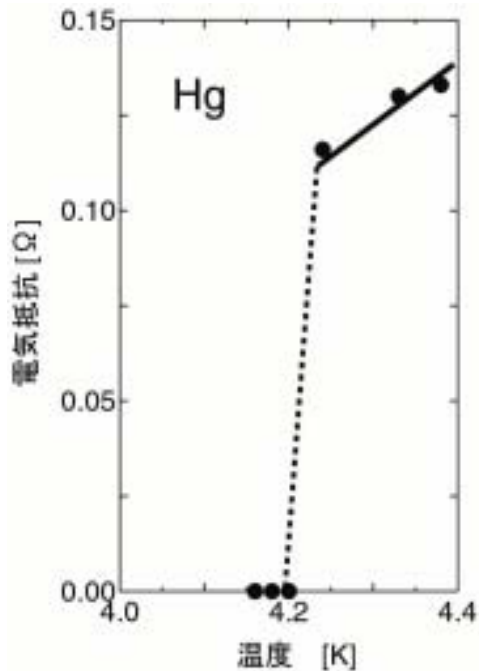
物質・材料研究機構 強磁場研究センター

和田 仁

- 超伝導体の一般的特性
- 核融合炉用線材に求められる特性
- 候補線材の特性比較
- 強磁場マグネットの最前線

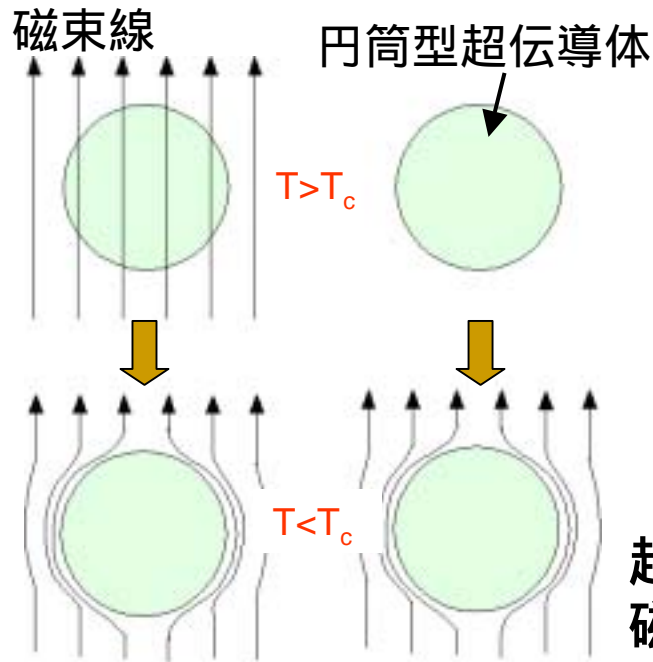
# 超伝導の特徴

## 抵抗ゼロ

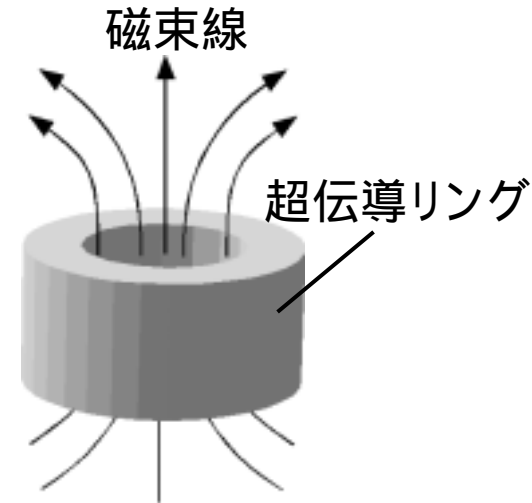


1911年 Kammerlingh Onnes  
が発見

## 完全反磁性



## 磁束量子化



超伝導リングに閉じ込められる  
磁束は磁束量子  $\Phi_0$  の整数倍

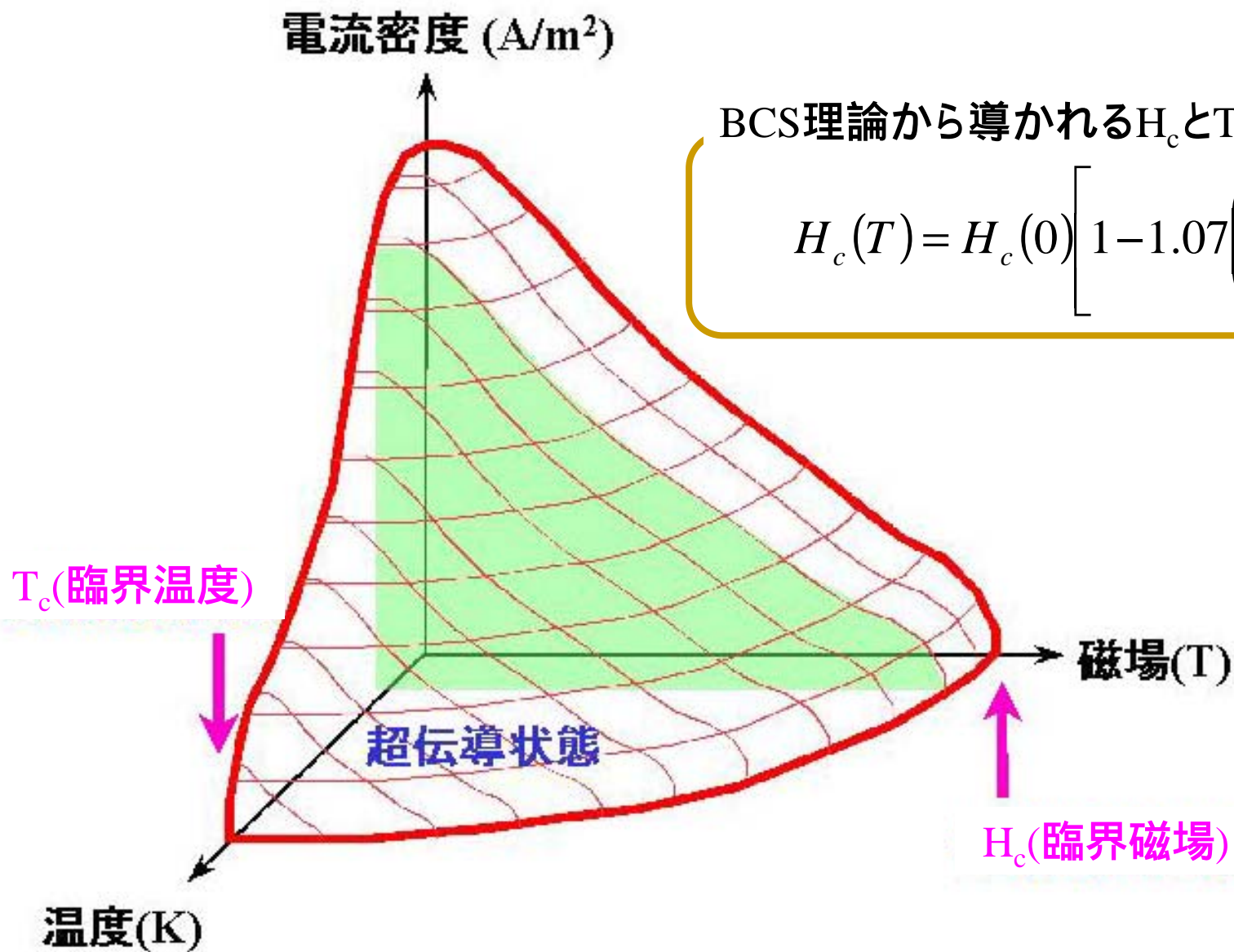
超伝導状態は巨視的な  
量子状態

# 超伝導臨界面

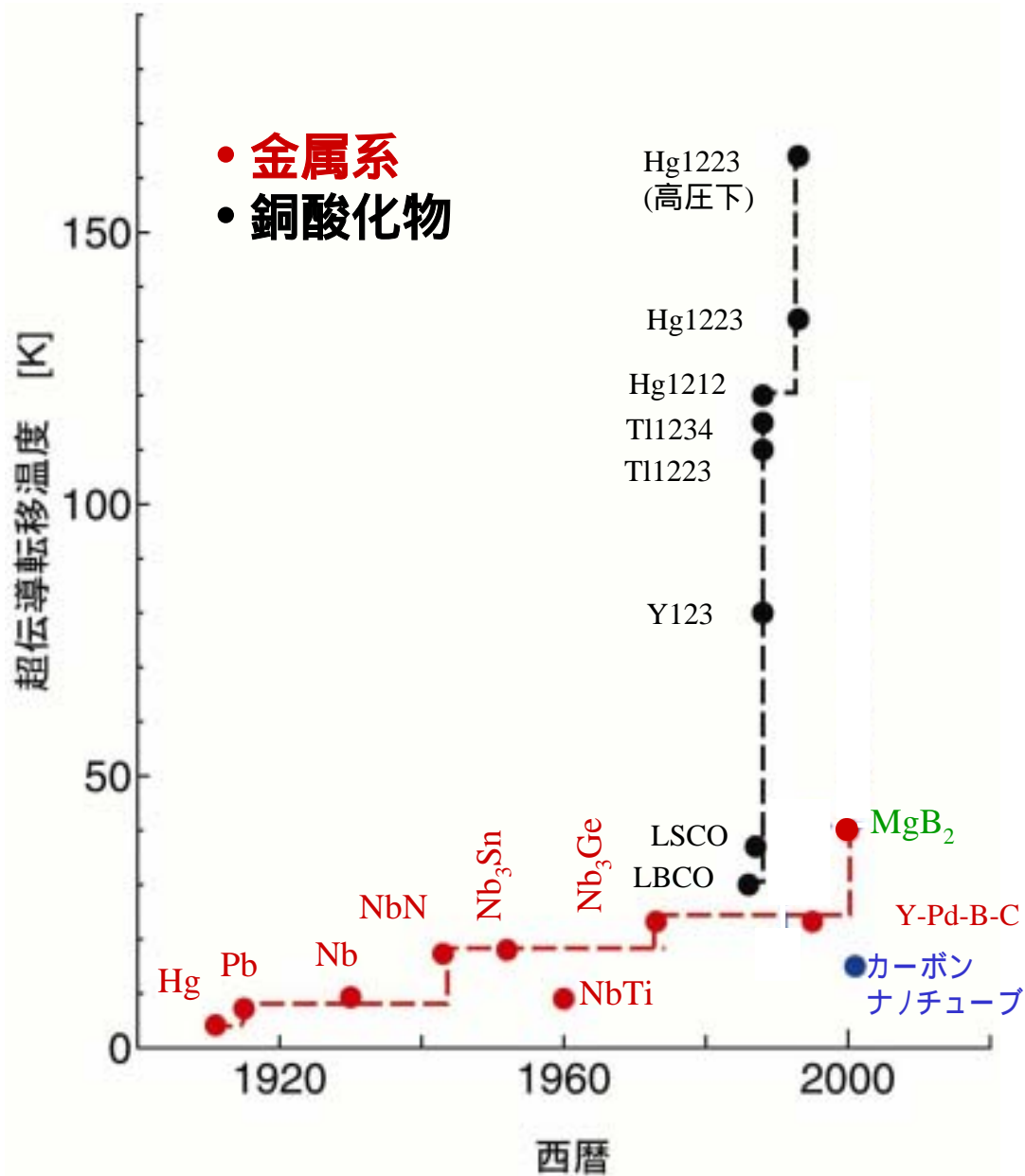
BCS理論 (1972年ノーベル賞)

BCS理論から導かれる $H_c$ と $T_c$ の関係

$$H_c(T) = H_c(0) \left[ 1 - 1.07 \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$



# 超伝導臨界温度の変遷



# 核融合炉用超伝導材料に求められる特性

- 磁場下で大きな臨界電流密度  $J_c$     ➡    優れた磁場特性
  - 電磁力下で  $J_c$  が劣化しない    ➡    耐ひずみ特性
  - 中性子照射に対して安定
  - 低誘導放射化
  - 長尺線材 (kmクラス)
- 
- 大電流容量導体 (数万Aクラス)
  - 多量の安定化材を付与可能

素線の特性

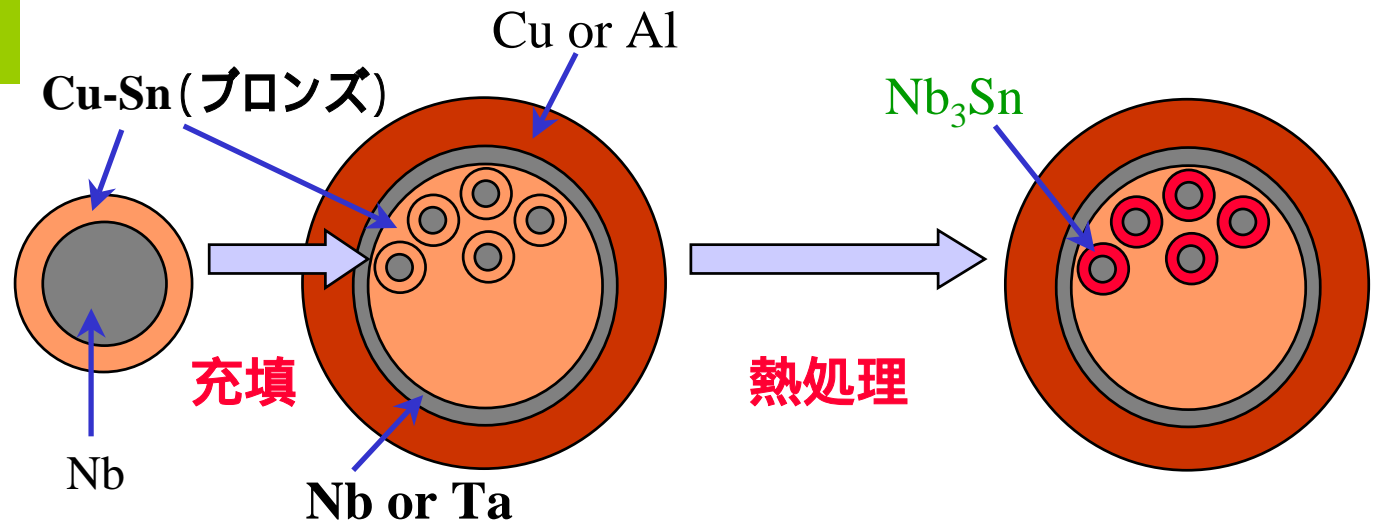


導体の特性

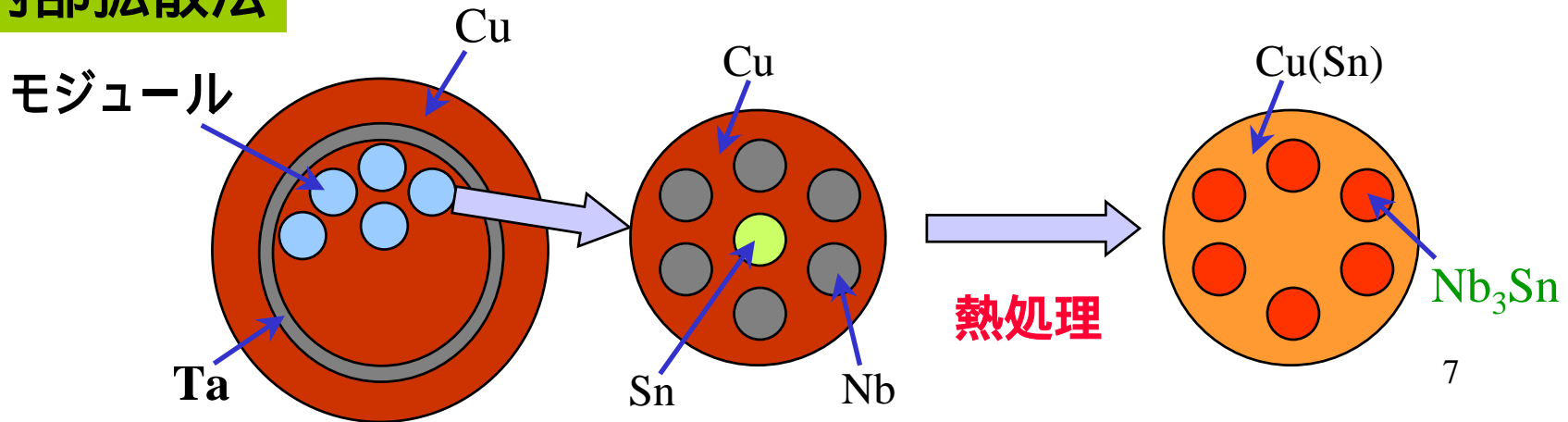
候補線材 :  $Nb_3Sn$ ,  $Nb_3Al$ , BPSCCO, YBCO

# Nb<sub>3</sub>Sn線材の製造方法

## ブロンズ法



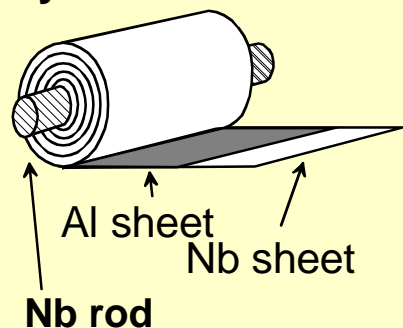
## 内部拡散法



# Nb<sub>3</sub>Al線材の製造方法

急熱急冷法  
(RHQT)

Jelly-roll



押し出し  
+ 線引き

前駆体: Nb/JR Nb/Al

ジュール加熱  
+  
急冷

Nb/Nb(Al)<sub>ss</sub>

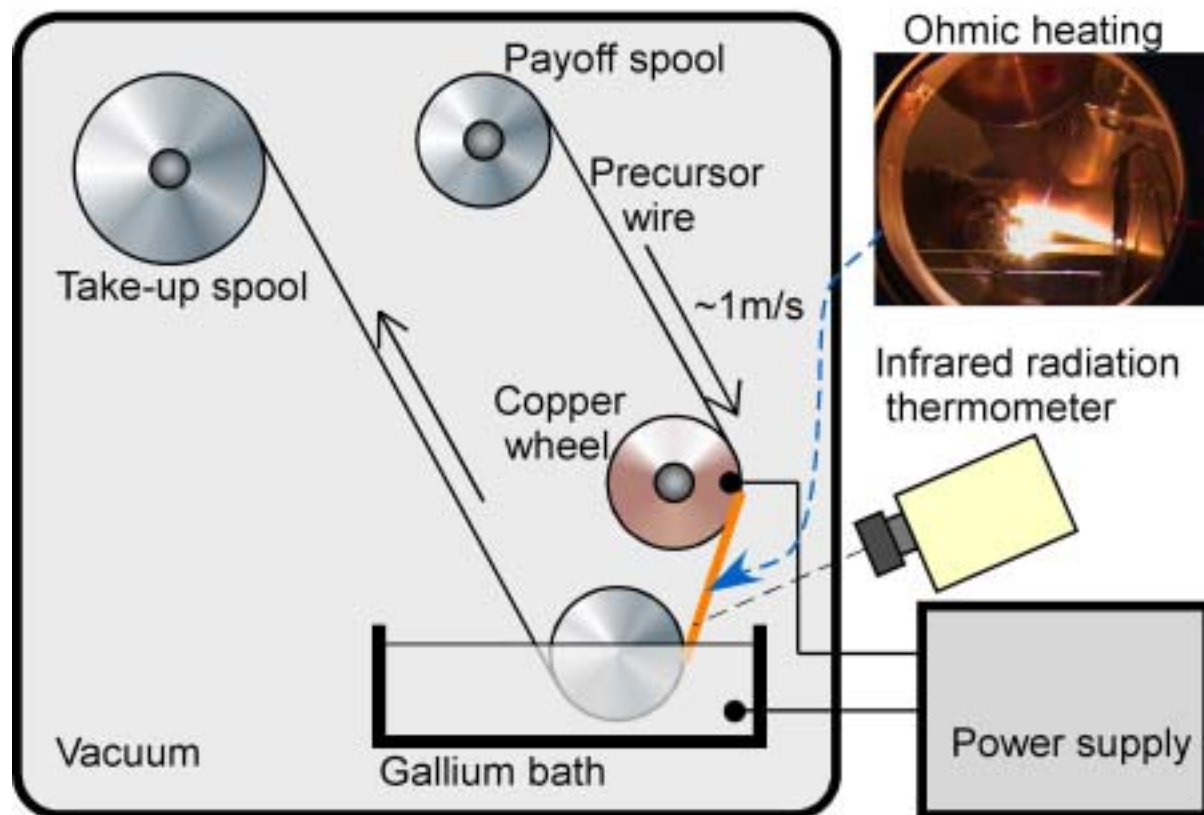
bcc  
過飽和固溶体  
Cuクラッド

Cu/Nb/Nb(Al)<sub>ss</sub>

変態熱処理

Cu/Nb/Nb<sub>3</sub>Al

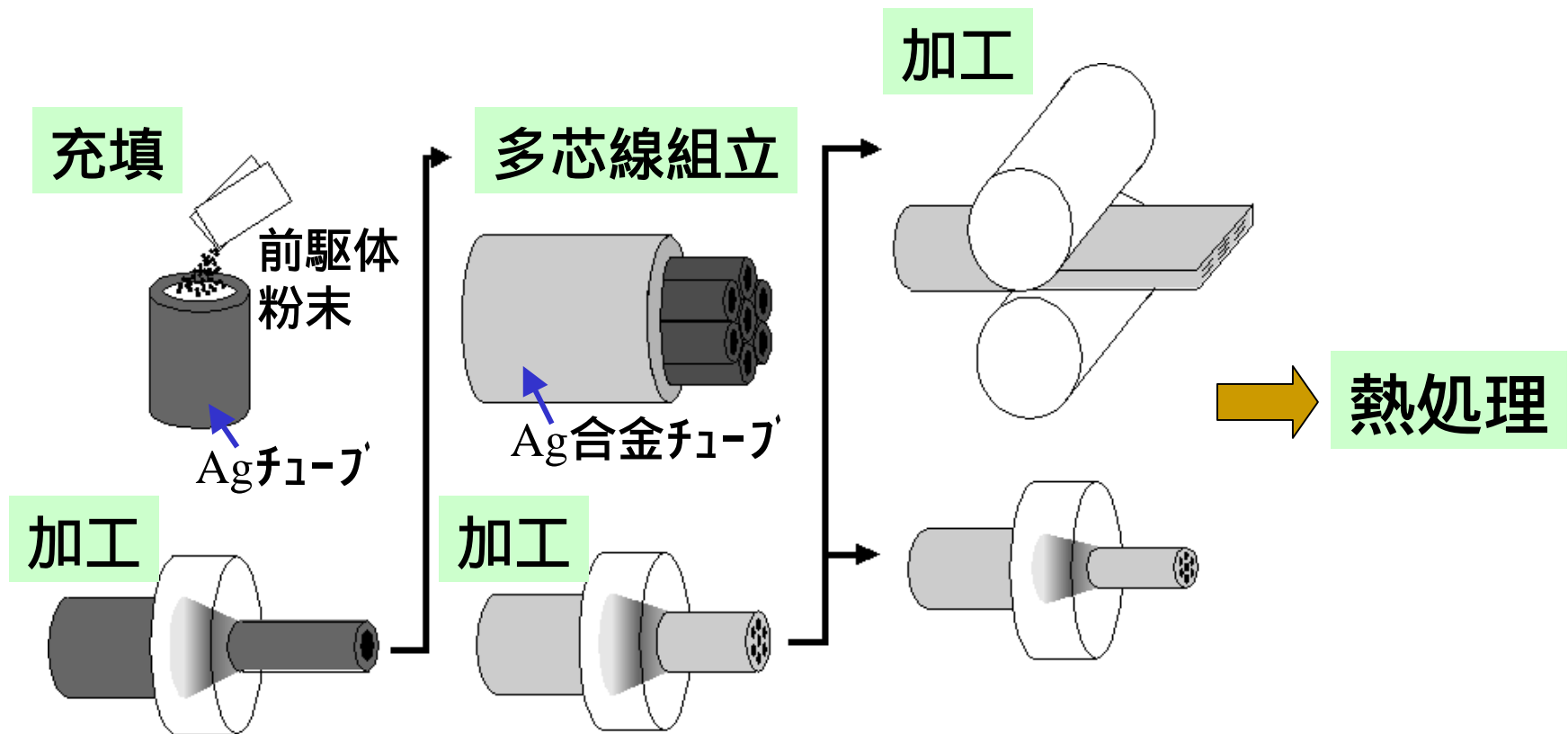
化学量論組成の実現





# Bi系酸化物線材の製造方法

## PIT (Powder In Tube) 法



# YBCOテープ線材の製造方法

## RABiTS法

(Rolling Assisted Bi-axially  
Textured Substrate)

基板

2軸配向基板  
(Ni, NiW etc)

基板の配向を  
引き継ぐ



バッファー層

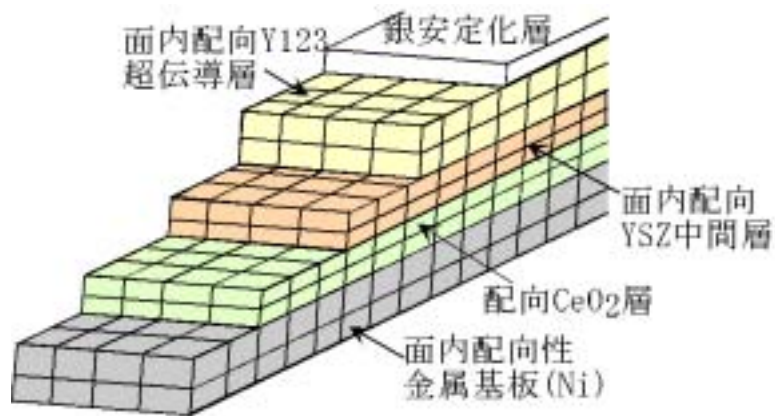
2軸配向中間層



YBCO

TFA-MOD法 (有機金属堆積法)

PLD法 (Pulsed -laser deposition)



## IBAD法

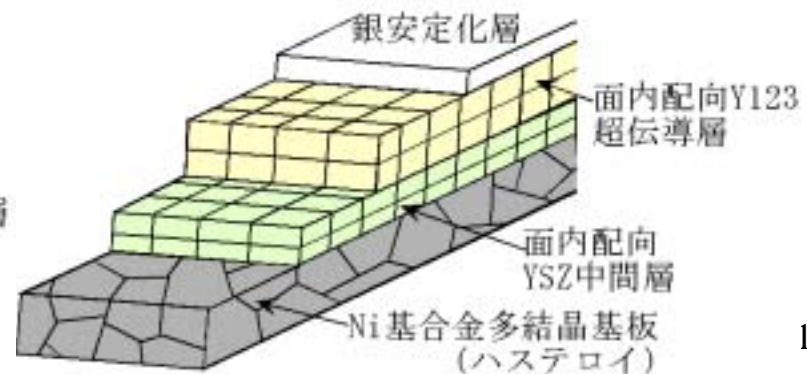
(Ion Beam Assisted Deposition)

Ni基合金多結晶基板



定エネルギー、定方向の  
イオンを照射しつつ製膜

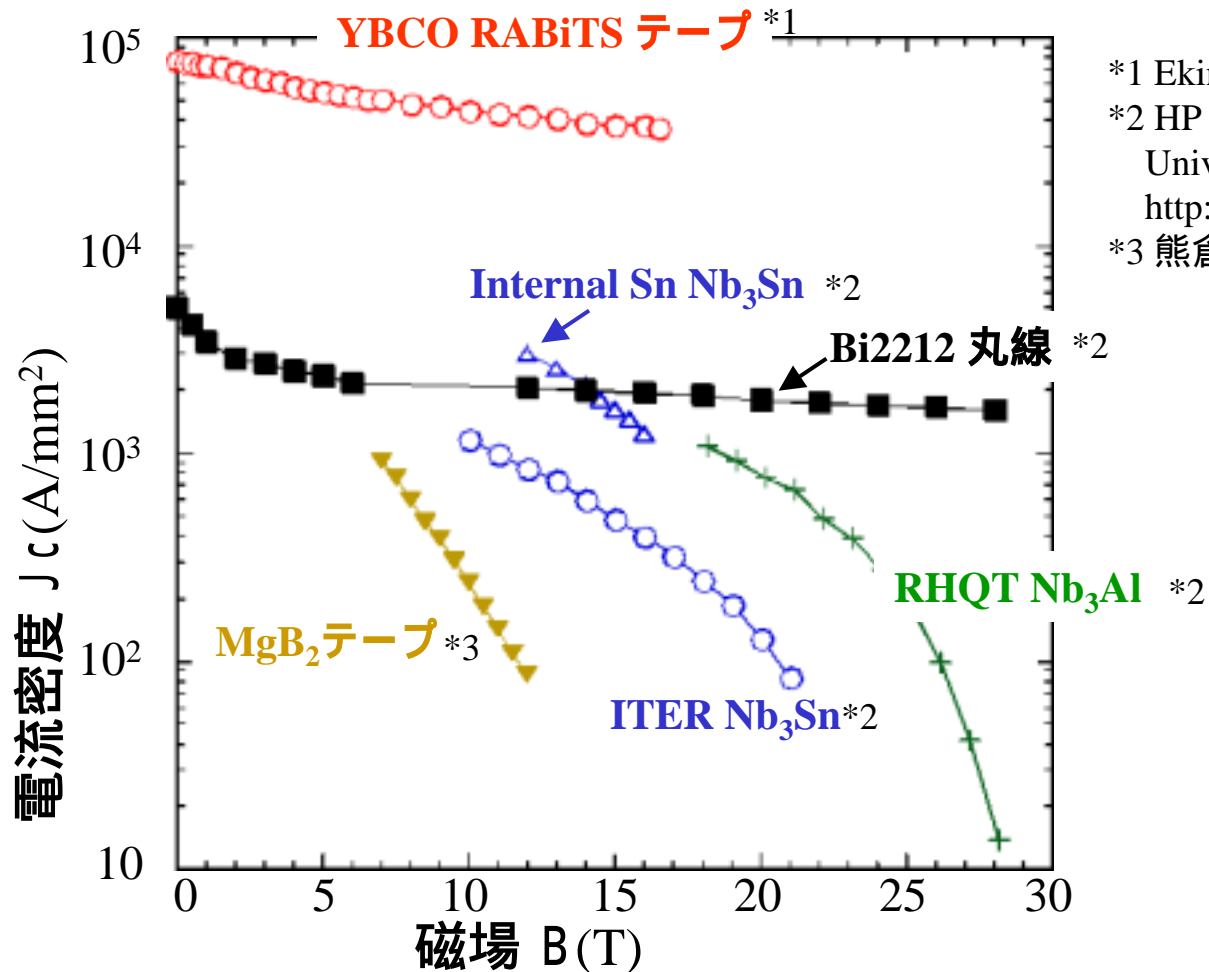
2軸配向中間層



# 臨界電流密度 — 磁場特性

YBCO > BSCCO > Nb<sub>3</sub>Al > Nb<sub>3</sub>Sn

← 臨界電流密度 J<sub>c</sub>



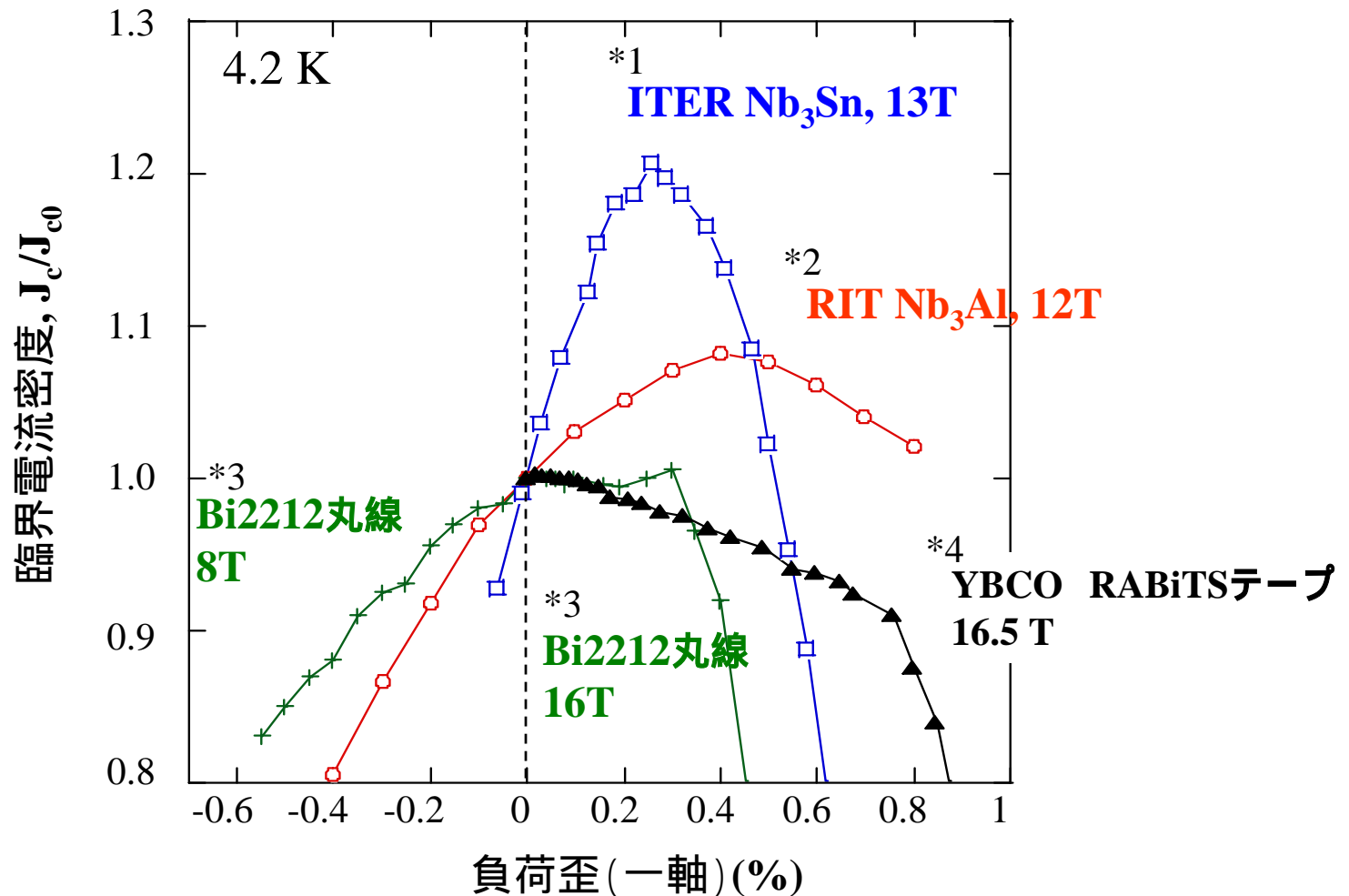
\*1 Ekin et al, NIST annual review (2003).

\*2 HP of Applied superconductivity center,  
University of Wisconsin.

<http://www.asc.wisc.edu/plot.htm>

\*3 熊倉ら, 低温工学, Vol38 (2003) 583.

# 耐ひずみ特性



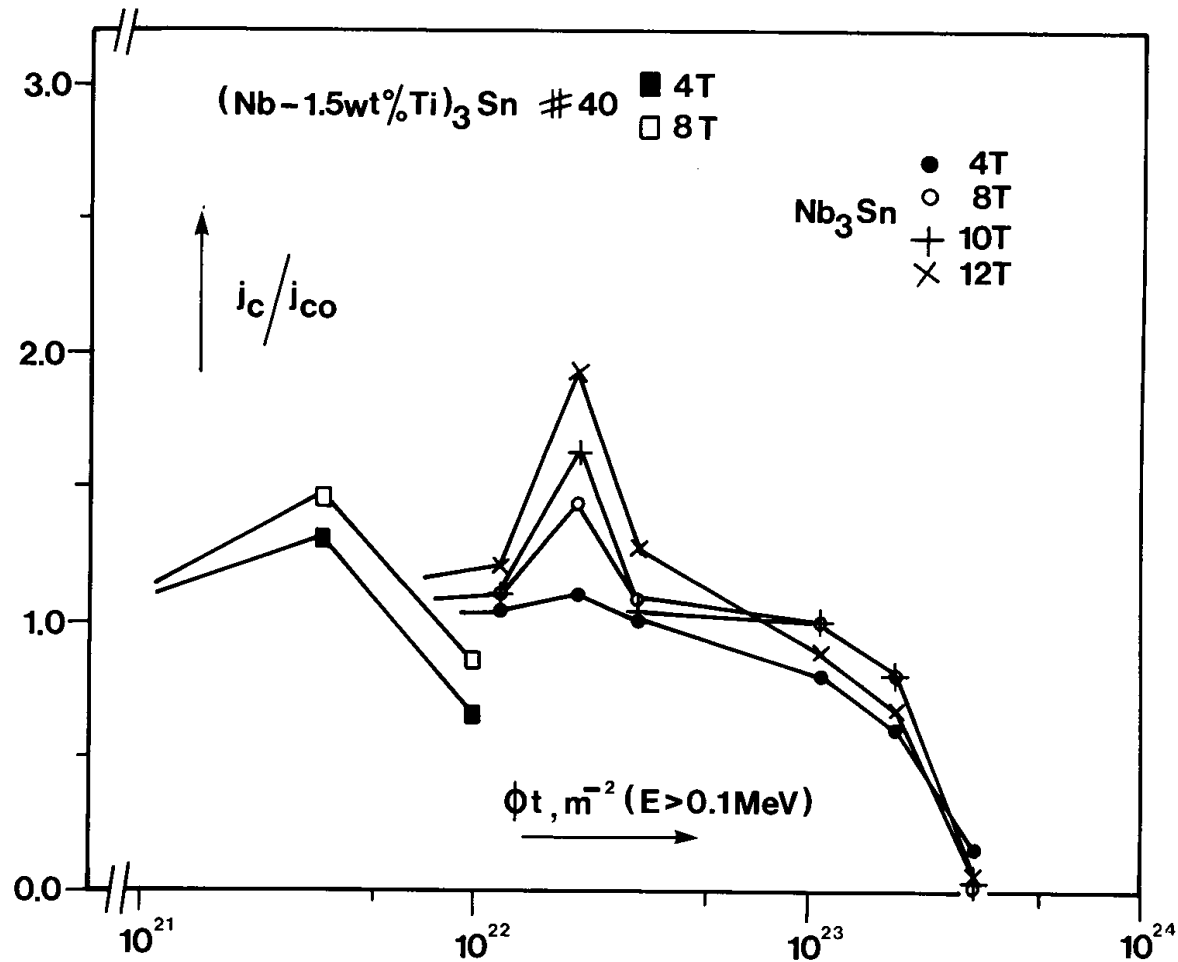
\*1 Uglietti et al, Supercond. Sci. Technol., 16 (2003) 1000.

\*2 Takeuchi et al, Appl. Phys. Lett., 71 (1997) 122.

\*3 ten Haken et al, IEEE Trans. Appl. Supercond., 5 (1995) 1298.

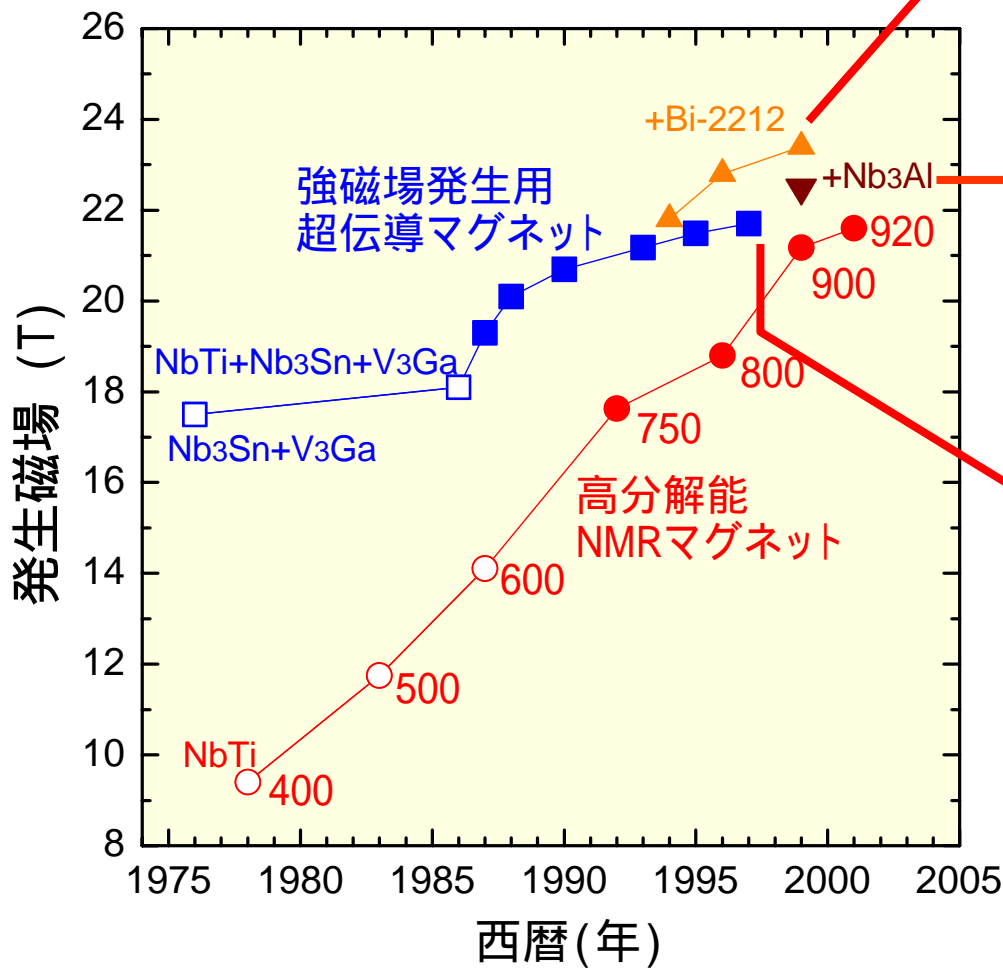
\*4 Ekin et al, Annual review (2003).

# 耐中性子照射



中性子照射量と臨界電流密度の関係 ( $\text{Nb}_3\text{Sn}$ )

# 超伝導マグネット発生磁場の変遷



Nb3Al  
(22.5 T)

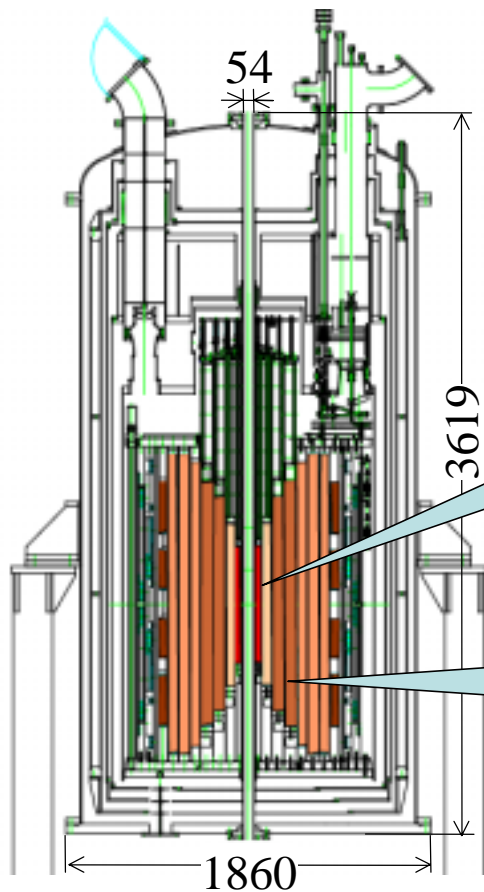
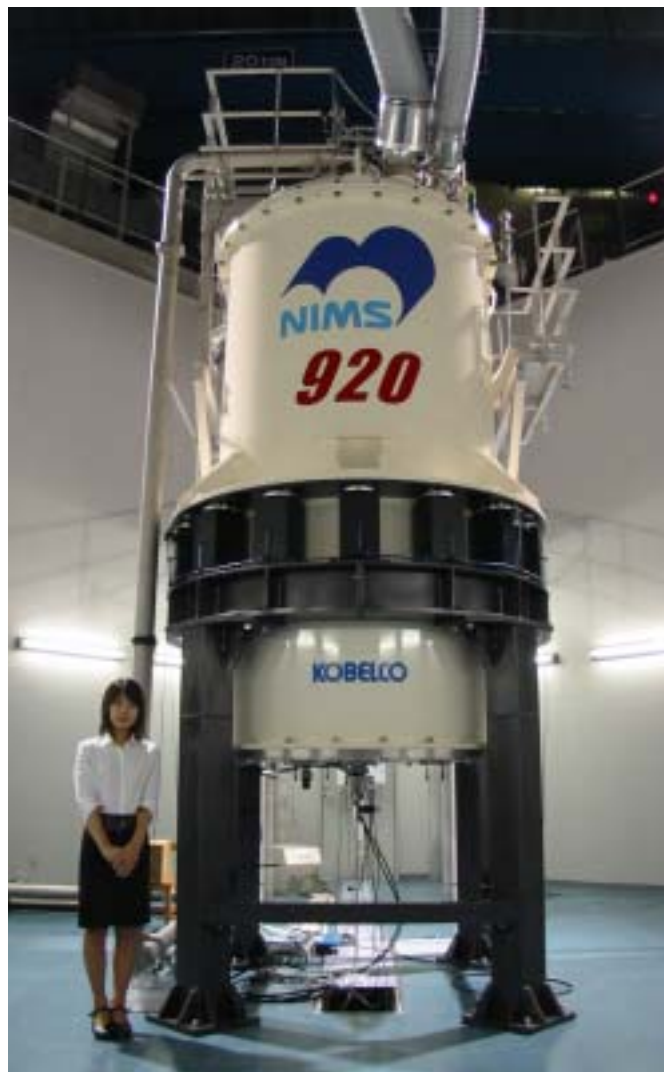


Bi-2212内層コイル  
(23.4 T)

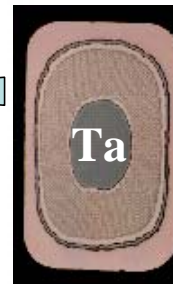


Nb3Sn (21.7 T)

# 920 MHz NMRスペクトロメータ



強磁場で使用できる  
高臨界電流密度  
 $(\text{Nb,Ti})_3\text{Sn}$ 線材



強い電磁力下で  
特性が劣化しない  
Taで補強した  
 $(\text{Nb,Ti})_3\text{Sn}$ 線材

高分解能NMRマグネット  
世界最高磁場 **21.6 T** で動作  
磁場の時間的安定性  
減衰 < 1% / 1,000年