



# 核融合研究開発基本問題検討会

---

## 核融合炉用超伝導コイルの開発

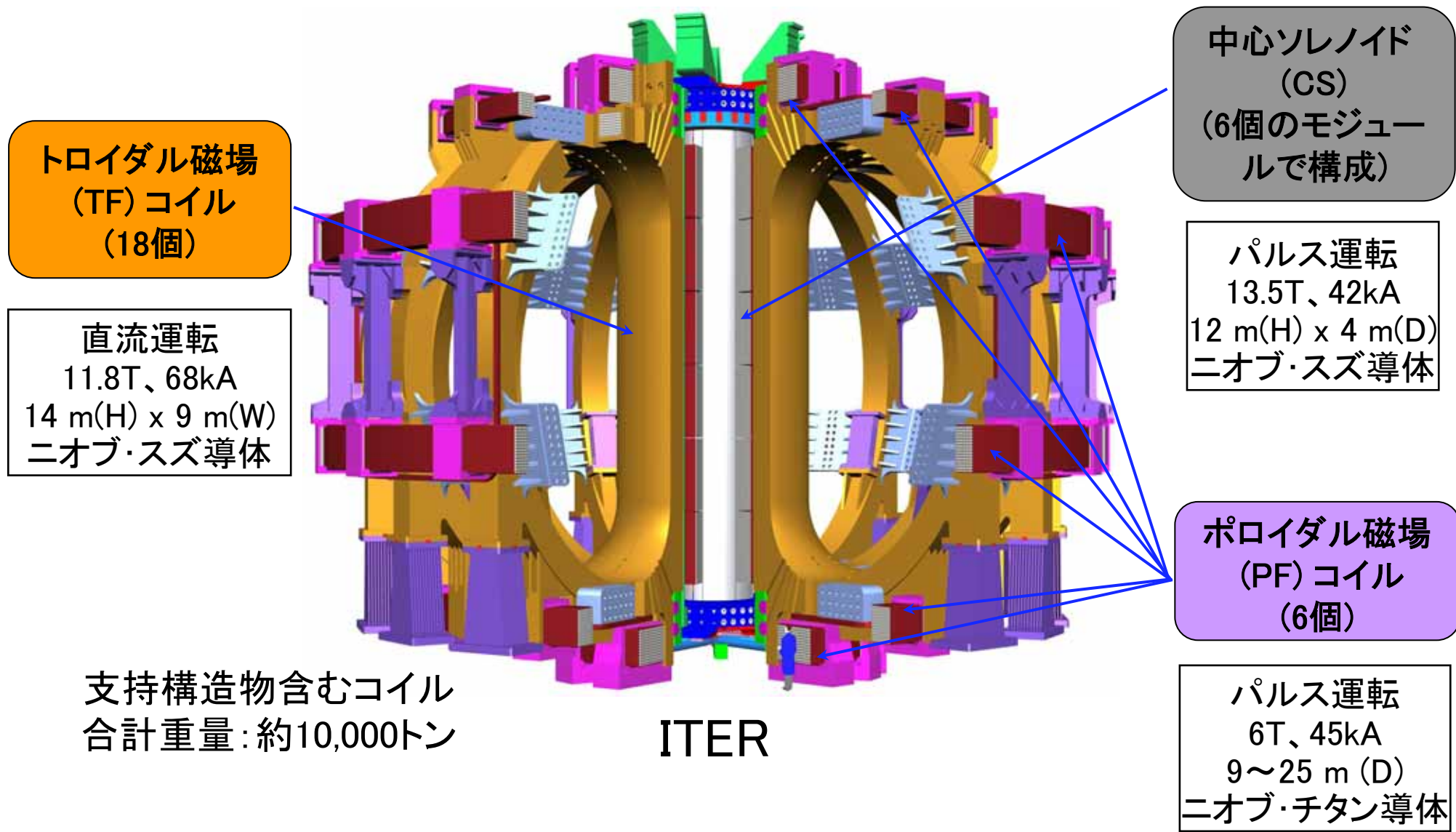
### 内 容

1. これまでの開発
2. ITER工学R&Dの成果
3. 発電実証プラントに向けた開発と課題
  - ①ニオブアルミ導体
  - ②高温超伝導導体

平成16年2月24日

原研 那珂研究所 核融合工学部  
超電導磁石研究室  
奥野 清

# 核融合炉の超伝導コイル・システム





# 核融合炉用超伝導コイルの特徴

---

- 大型コイルで高磁場を発生
  - ⇒ 導体の大電流化、高電流密度化
  - ⇒ 大きな電磁力に耐える導体、コイル構造の実現
- プラズマ運転シナリオに応じたパルス動作
  - 変動磁場
    - ⇒ 導体の交流損失の低減
  - 繰り返し荷重
    - ⇒ 疲労を考慮した構造設計の実施
- 中性子照射環境下での運転
  - 核加熱(特にTFコイル)
  - 超伝導特性の変化、絶縁物強度の低下
    - ⇒ 材料の評価・選択、これらの影響を考慮した設計の実施

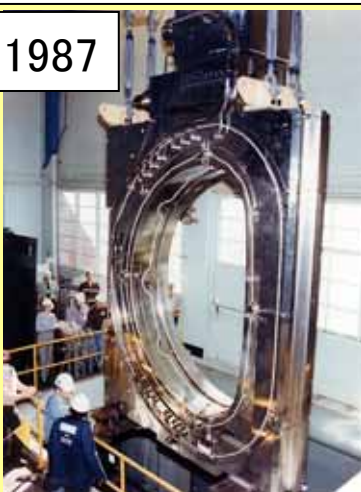
# 核融合炉用超伝導コイルの開発の歴史

1985



TMC (原研)  
12T, 7kA,  $\text{Nb}_3\text{Sn}$

1987



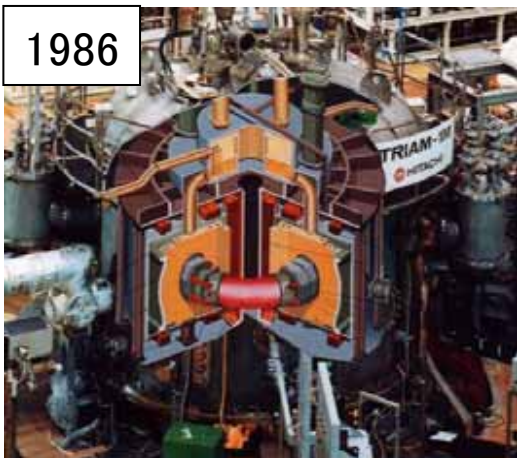
LCT (原研)  
 $\text{NbTi}$ , 9T, 10.8kA

1989



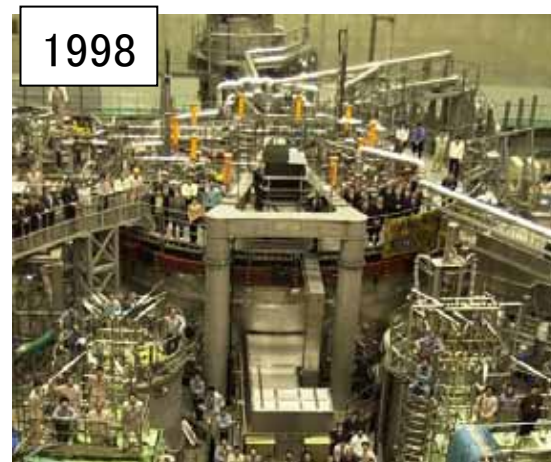
DPC (原研)  
 $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , 17kA, 7T

1986



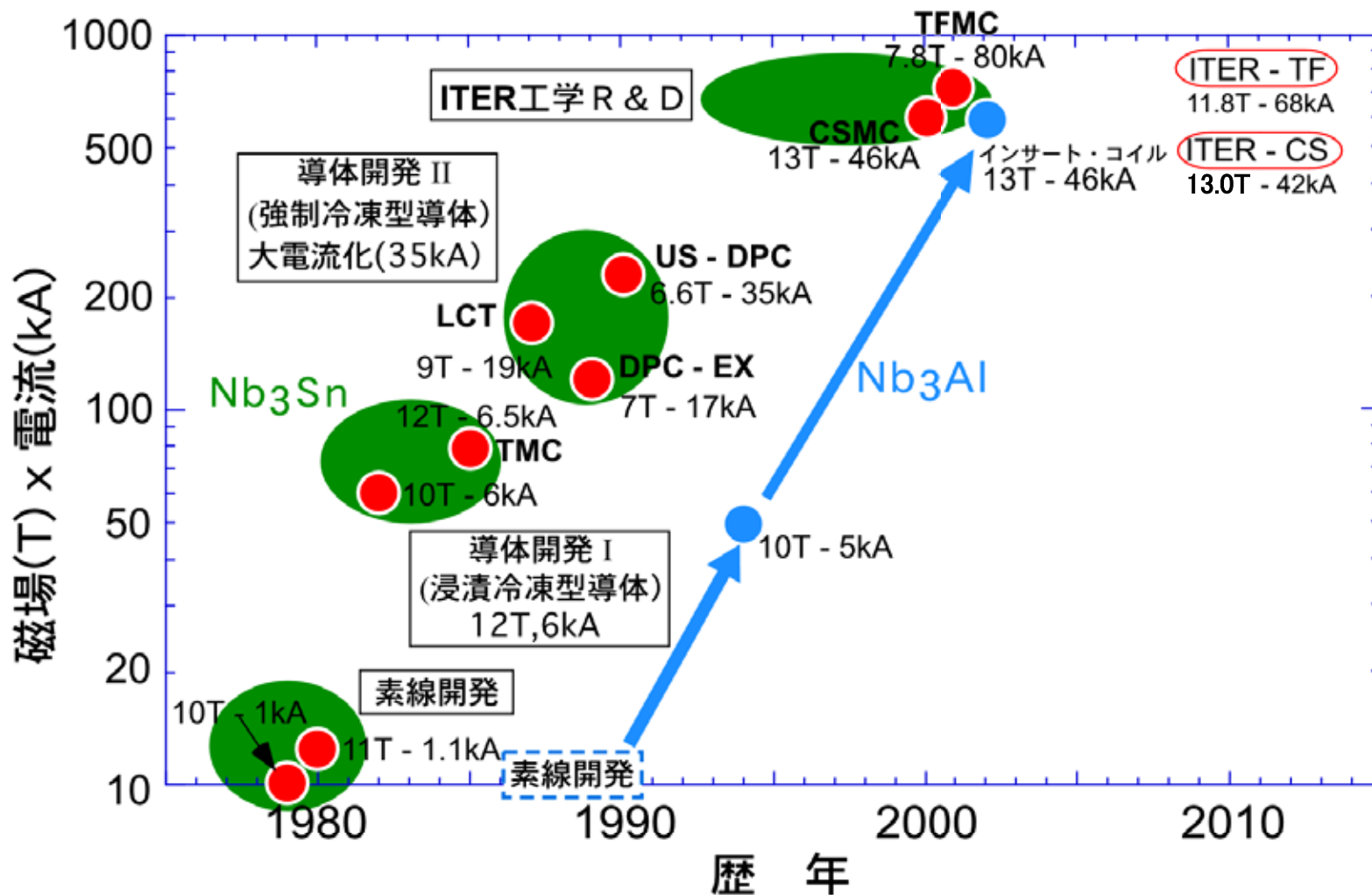
TRIAM-1M (九州大学)  
 $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , 11T, 6.2kA

1998



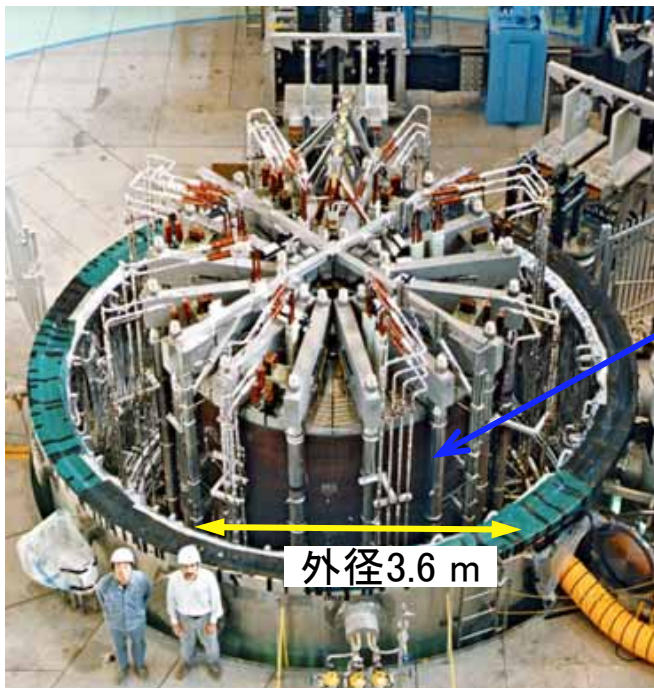
LHD (核科研)  
 $\text{NbTi}$ , 13kA, 7T

# コイルの高磁界化、大型化の開発ステップ



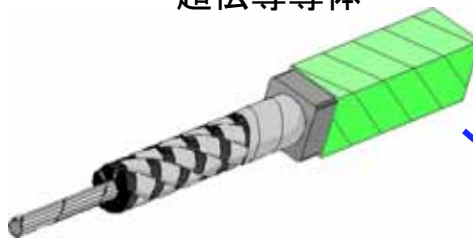


# ITER超伝導コイルの工学R&Dと開発目標



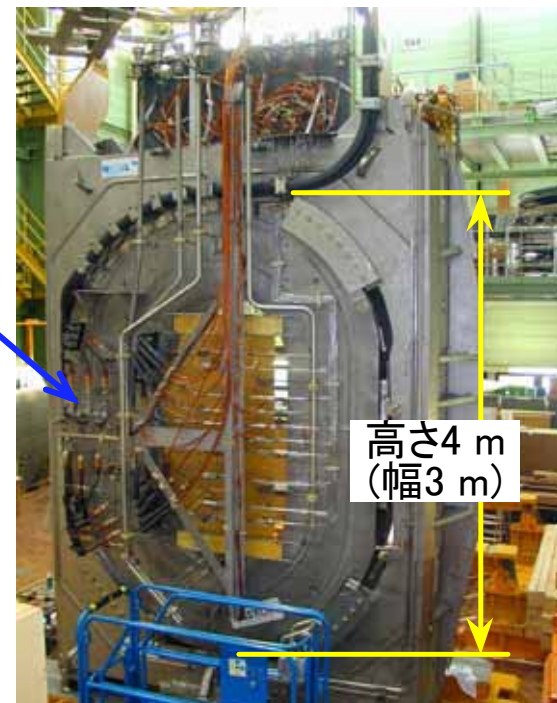
原研の試験装置に据え付けられた  
**CSモデル・コイル**

モデル・コイルに使用された  
超伝導導体



## 開発目標

- 高性能 $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 超伝導線材
  - 高電流密度
  - 交流損失の低減
- 大電流化(ケーブル化)
  - 電流値: 40~68 kA
  - 交流損失の低減



FZK(ドイツ)の試験装置に据え付け  
られた**TFモデル・コイル**

## 開発目標

- 実機と同等の大きさのコイルを製作
- 運転シナリオの実現に必要な性能実証
  - 電流値: 46 kA
  - 最大磁場: 13 T
  - 最大磁界変化: +0.4 T/s、-1.2 T/s

## 開発目標

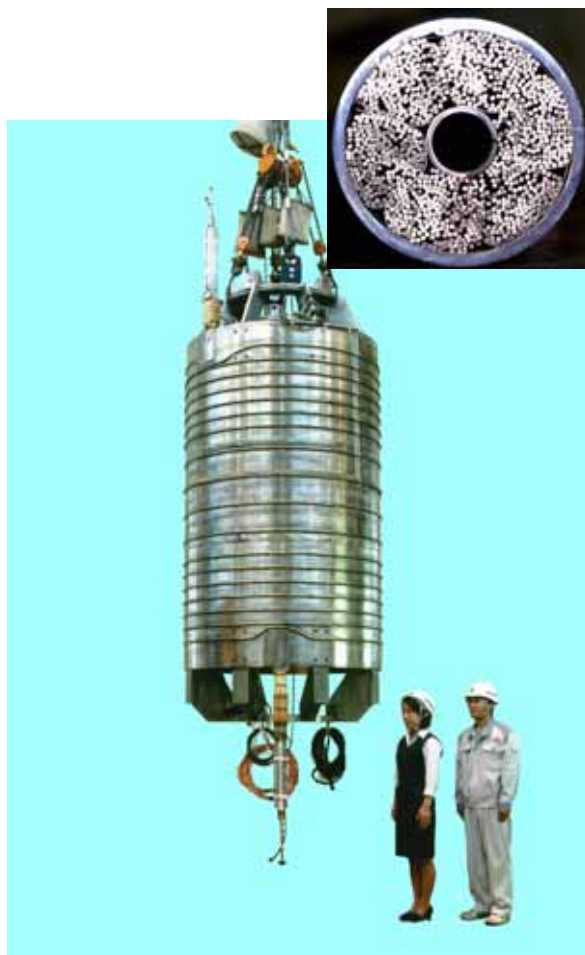
- 実機の約1/3の大きさのコイルを製作
- 実機と同等の電磁力の下で機械的構造、超伝導性能を実証
  - 電流値: 80 kA
  - 最大磁場: 10 T

# ITERで開発した3種類の導体と試験コイル

定格13T, 46kA



CS インサート



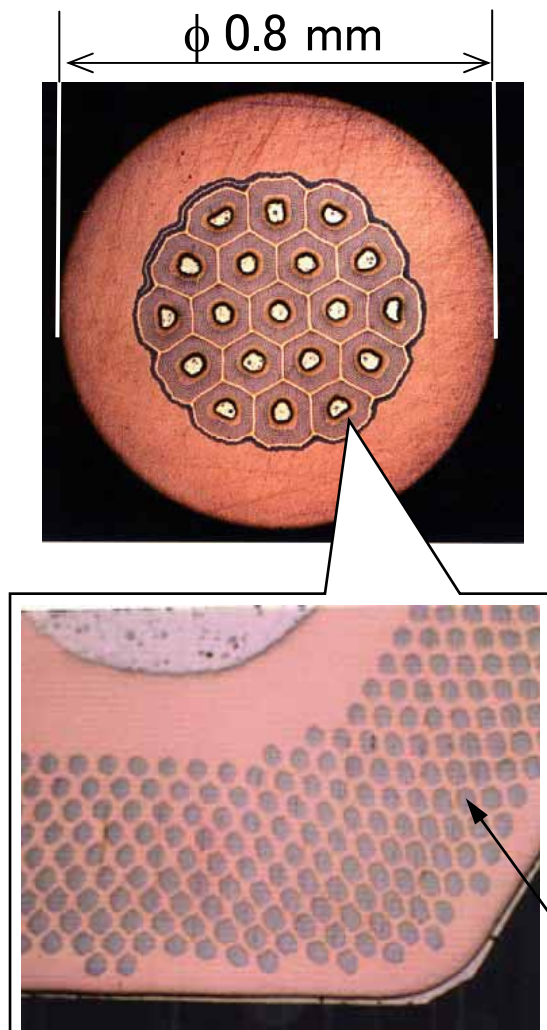
TF インサート



Nb<sub>3</sub>Al インサート

# ITERで開発された高性能Nb<sub>3</sub>Sn素線

Nb<sub>3</sub>Sn素線断面(内部拡散法)



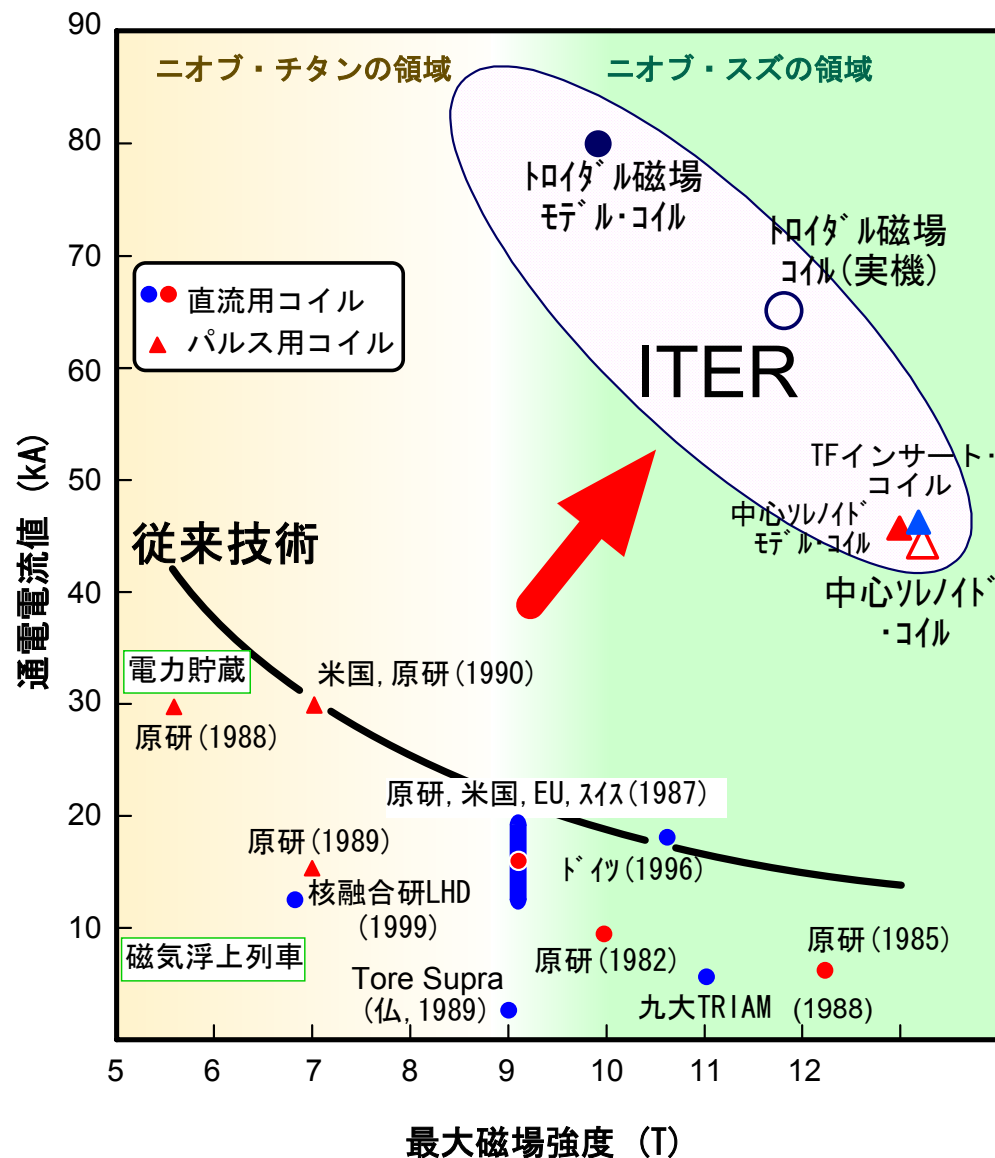
Nb<sub>3</sub>Snフィラメント  
( $\phi 3\mu\text{m}$ 、8,000本)

ITERモデルコイル用として  
世界の7社で約29トンのNb<sub>3</sub>Sn素線を製作

線径	0.81 mm
銅比	1.5
表面処理	クロムメッキ
臨界電流密度 (12T、4.2K)	700 A/mm <sup>2</sup> 以上 (内部拡散法) 550 A/mm <sup>2</sup> 以上 (ブロンズ法)
ヒステリシス損失 ( $\pm 3\text{T}$ の磁場変化)	600 mJ/cm <sup>3</sup> 以下 (内部拡散法) 200 mJ/cm <sup>3</sup> 以下 (ブロンズ法)



# ITER工学R&Dの成果



## ITER工学R&Dの成果

- ・ CS及びTFモデル・コイルを製作、性能実証を行い、設計概念や設計手法の正当性を示すとともに、コイル製作技術を確立した。
- ・ これらの試験設備として5kW冷凍機や50kA電源装置を建設し、延べ8,000時間の運転実績を達成、超伝導コイルの安定した運転に必要な技術を開発。



ITER超伝導コイル建設に必要な  
大型化、高磁界化を達成

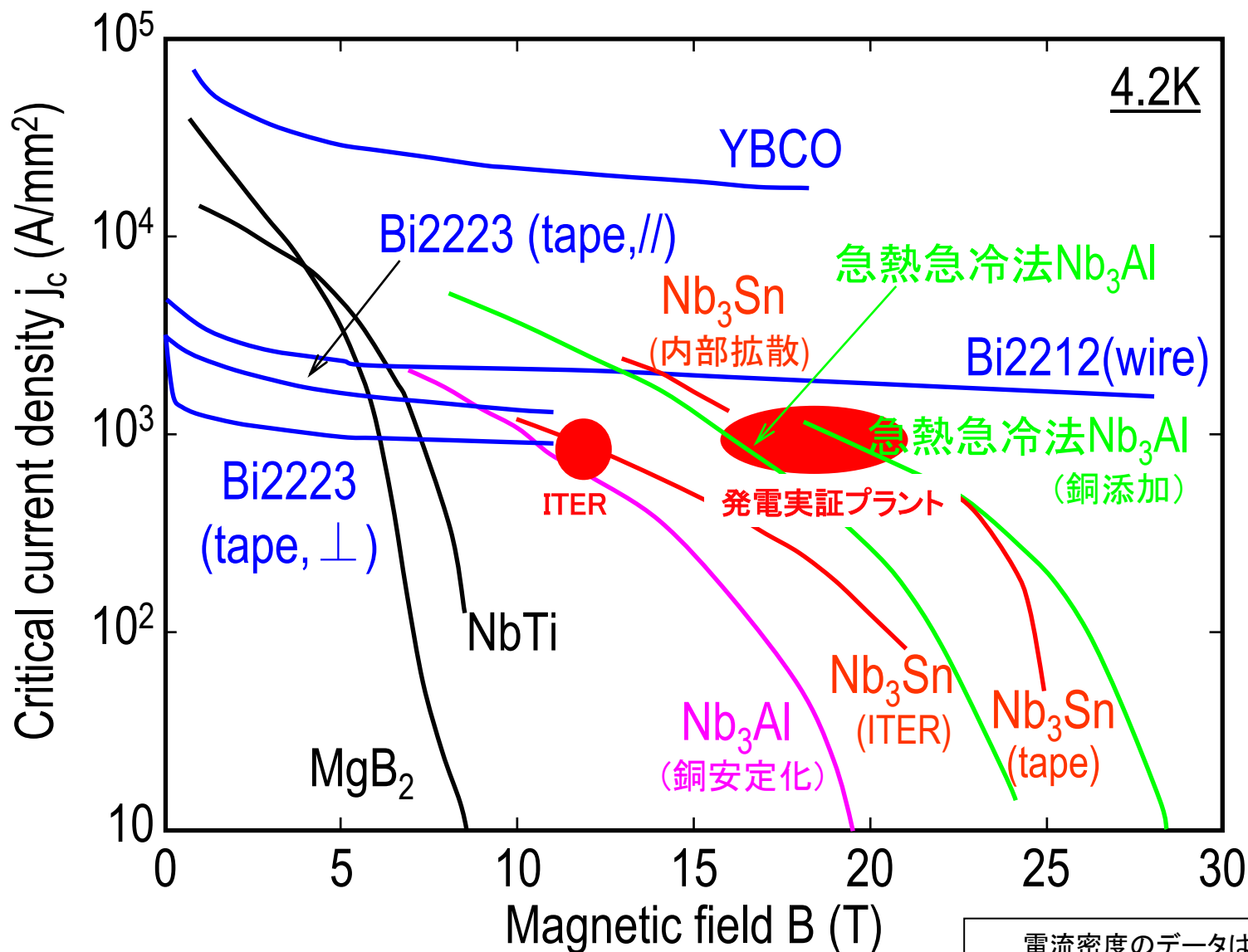


# 発電実証プラントのTFコイル目標パラメータ

	発電実証プラント	ITER
磁場	16～20 T	11.8 T
電流	80～100 kA	68 kA
電流密度	800～1000 A/mm <sup>2</sup>	800 A/mm <sup>2</sup>
コイル大きさ	12 x 14 m	9 x 14 m
パルス磁場	小さい	0.2 T/s*
中性子照射	10 <sup>22</sup> ～10 <sup>23</sup> n/m <sup>2</sup> (暫定値)	10 <sup>22</sup> n/m <sup>2</sup>

\*誘導によるプラズマ立ち上げ時

# 発電実証プラントの目標臨界電流値



# 導体設計で考慮すべき項目①

## 1. 超伝導導体の安定化

導体の一部で、超伝導状態が壊れ常伝導転移しても、自発的に超伝導状態に復帰するように設計を行う。

### 設計上の対応

- ①臨界温度を高くする  
(超伝導材料で決まってしまう)
- ②素線内に安定化銅を配置
- ③冷却特性の向上

## 2. 交流損失の低減

変動磁場により導体内で発生する交流損失を低減し、導体の過度な温度上昇、クエンチを避ける。

### 設計上の対応

- ④磁化損失の低減(フィラメントの細線化)
- ⑤導体の細分化(撚線構造)
- ⑥素線表面の電気抵抗増加(クロムメッキ)

## 3. クエンチ時の温度上昇

常伝導転移がコイル全体に広がった場合(クエンチ)、電流を急速放電するが、その時の導体の温度上昇を有る値(ITERでは250K)以下に押さえる。

### 設計上の対応

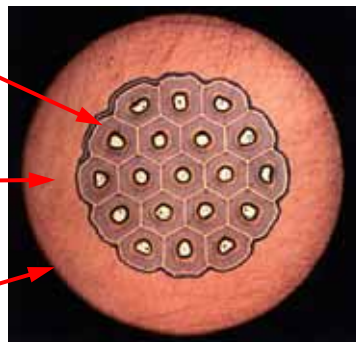
- ⑦銅部の増加(銅線を入れる)  
(安定化銅の寄与も考慮)

超伝導フィラメント

①、④

安定化銅 ②

⑥  
クロムメッキ



超伝導素線

③、⑤

素線、銅線を束ねる  
(約1,000本)

⑦

銅線



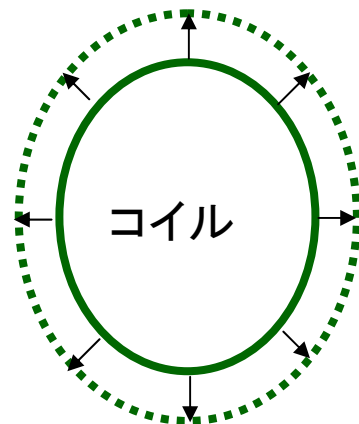
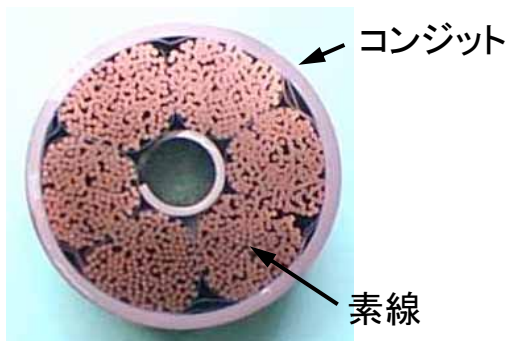
コンジット

- ・機械的補強
- ・ヘリウム容器



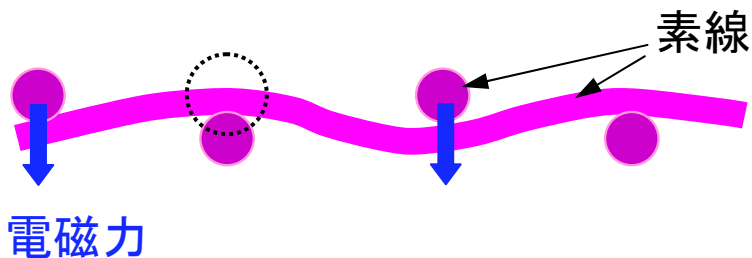
# 導体設計で考慮すべき項目②－歪の影響

## ① 補強材(コンジット)と超伝導素線の熱収縮率の違いによる熱歪



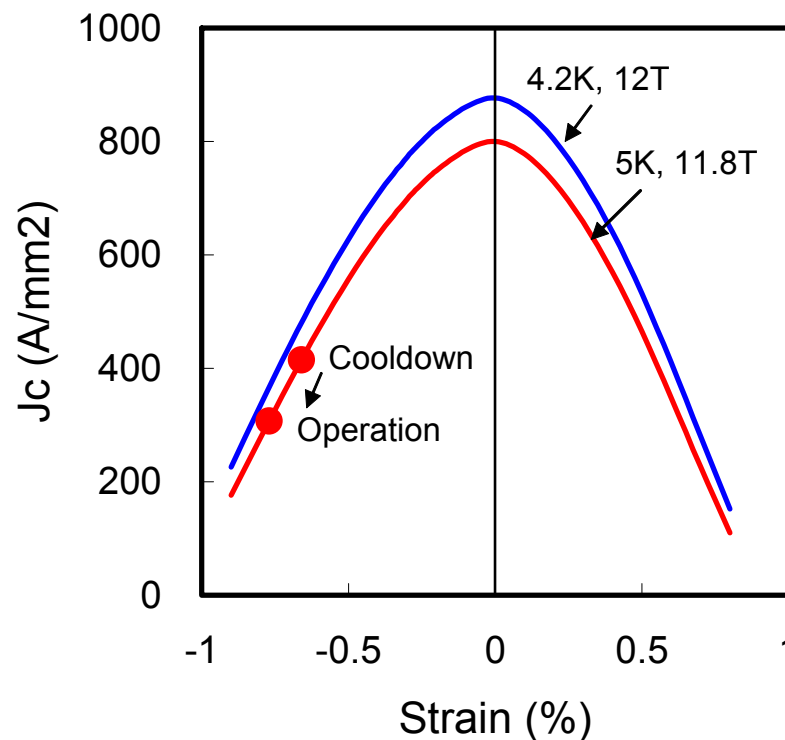
## ② 電磁力(拡張力)によるコイル全体の変形

## ③ 導体の構成に依存する局所的な歪(撚線構造の場合)



## ITER TFコイルの場合

- 超伝導素線( $\text{Nb}_3\text{Sn}$ )の歪
  - 4Kへの冷凍後: 0.66%
  - 通電状態: 0.77%
- ピーク値の約4割の臨界電流値



# 高磁場化に伴う課題

ITERとほぼ同じ断面内で  
電流値が3割(16T)～7割(20T)増加

## ①巻線部での平均的な電流密度を向上

- 対策
- 超伝導素線の電流密度の向上
  - 巻線部のグレーディング
  - 銅部の削減(安定化銅、クエンチ保護用)

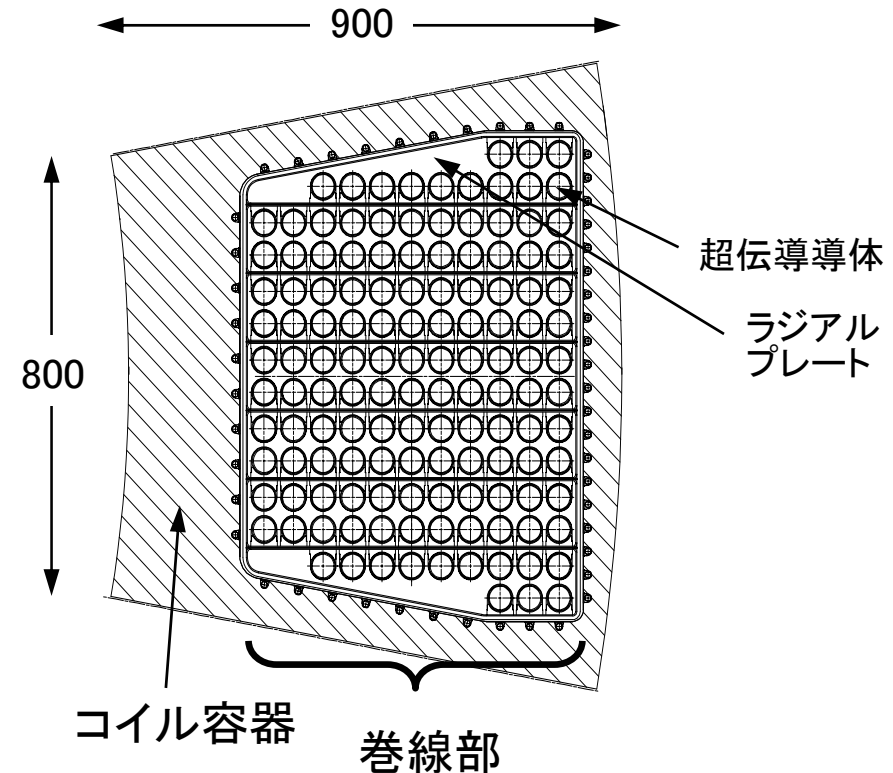
## ②コイルに加わる電磁力が約2～3倍に増加

- 対策
- 高強度低温構造材の使用  
(例えばJK2では、ITER構造材の1.2倍の降伏応力1200MPaが得られる。)
  - 炉構造の最適化による強度部材の増加  
(低アスペクト比の採用)

## ③TFコイルの急速放電時に真空容器に作用する電磁力が増加

- 対策
- 放電時定数を長くする
  - TFコイル内周側に銅巻線を付加し誘導電流を緩和

ITER TFコイル直線部の  
巻線部断面



構成比  
構造材7:導体2:絶縁物1

# Nb<sub>3</sub>Al導体の特徴

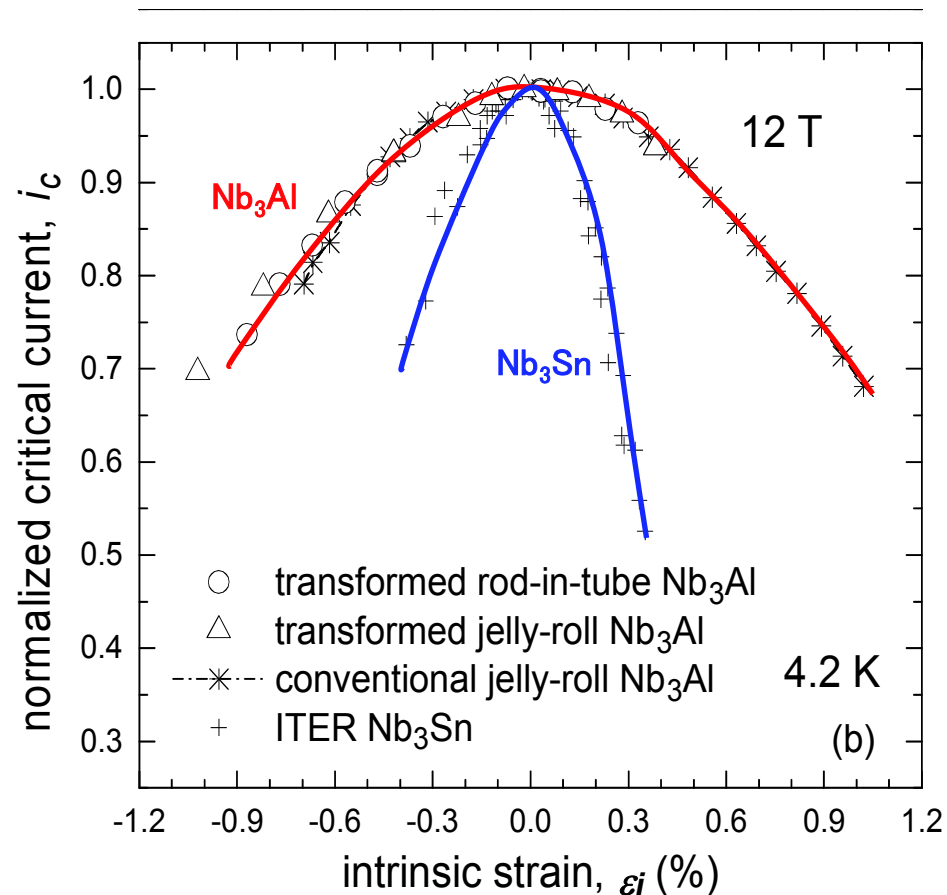
## Nb<sub>3</sub>Al導体

### 特徴

- 臨界磁場がNb<sub>3</sub>Snより高い。
- 歪による臨界磁場と臨界電流値の低下はNb<sub>3</sub>Snより極めて小さい。

### 現状

- 12T用Nb<sub>3</sub>Al導体の開発は完了。コイル化の技術も実証(銅安定化Nb<sub>3</sub>Al)。
- より高性能な線材の開発が進行中。
  - 急熱急冷法による線材で優れた性能(高磁場、高電流密度)を得ている。

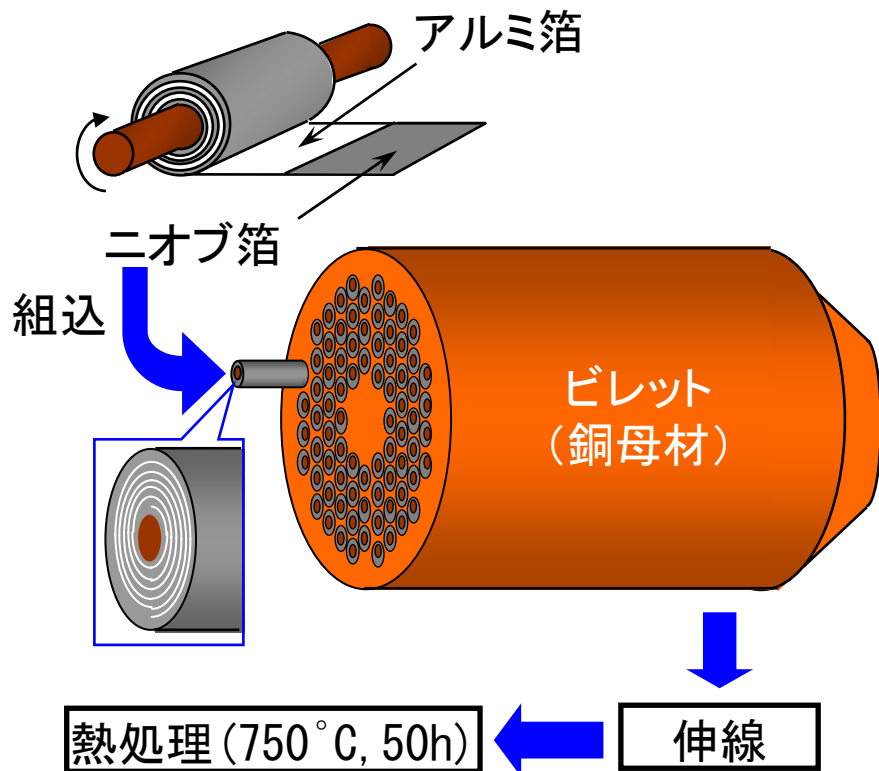


# Nb<sub>3</sub>Al素線の製作法

## 銅安定化Nb<sub>3</sub>Al(原研)

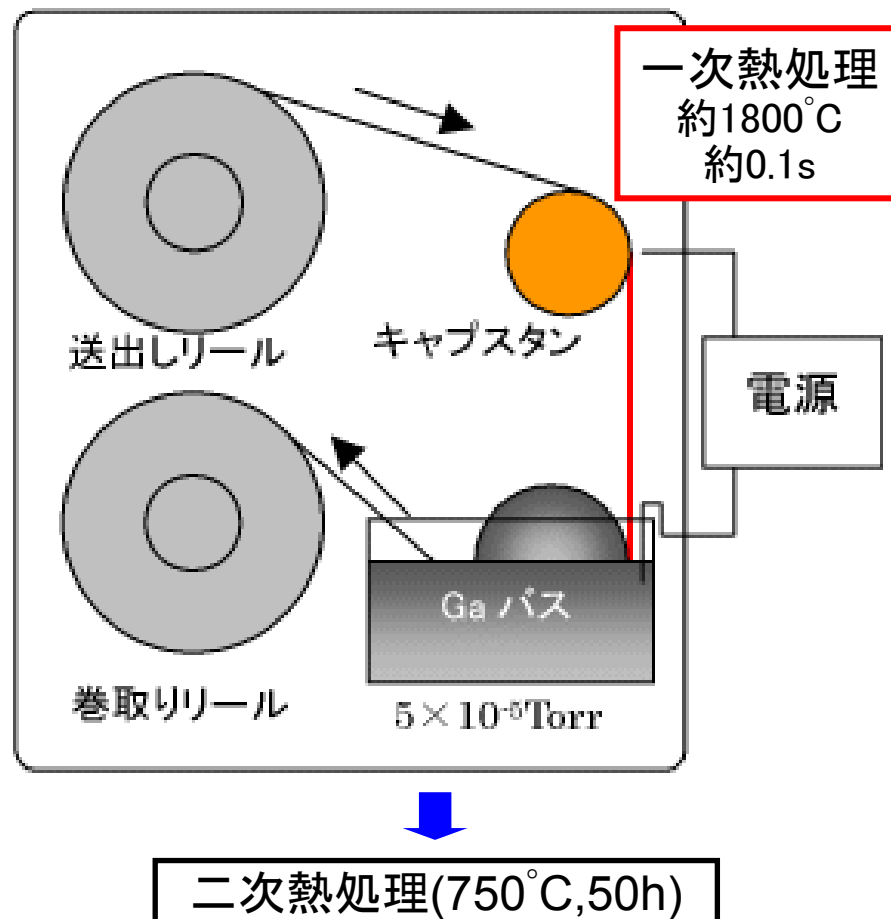
課題: 従来のNb<sub>3</sub>Al生成熱処理(1200°C以上)では安定化銅(融点1100°C)が溶解.

ニオブとアルミの拡散距離を1μm以下にし  
750°Cの熱処理温度でニオブアルミを生成



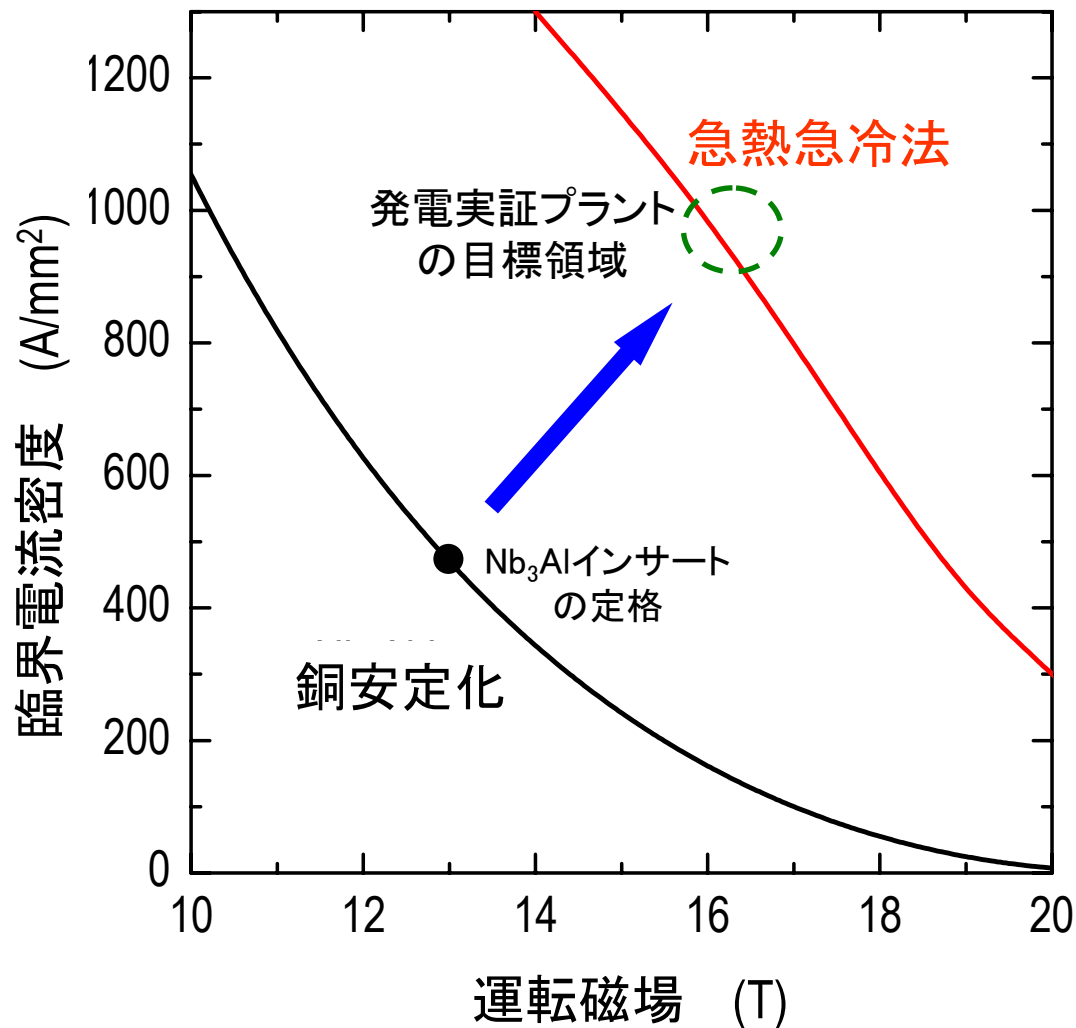
## 急熱急冷法Nb<sub>3</sub>Al(物材機構)

ビレット: 銅母材 => ニオブ母材





# Nb<sub>3</sub>Alの現状と課題



## 急熱急冷法Nb<sub>3</sub>Alの成果

- 高磁場で高臨界電流密度を得た (B=16T、J<sub>c</sub>=1000A/mm<sup>2</sup>以上)
- 単長300mまで長尺化に成功

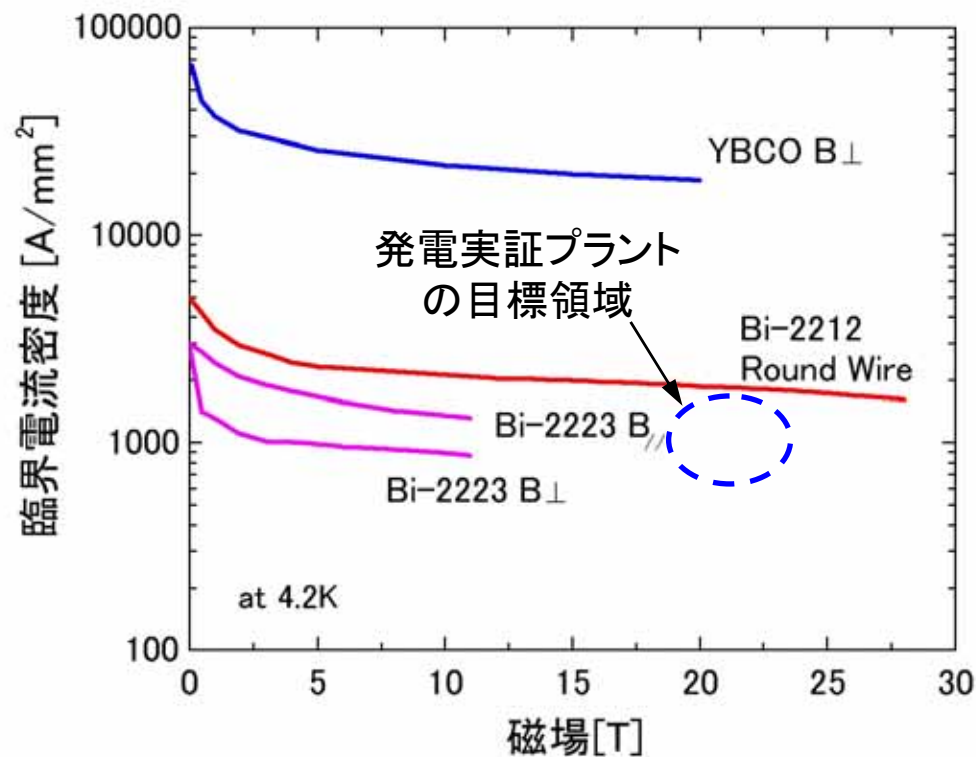
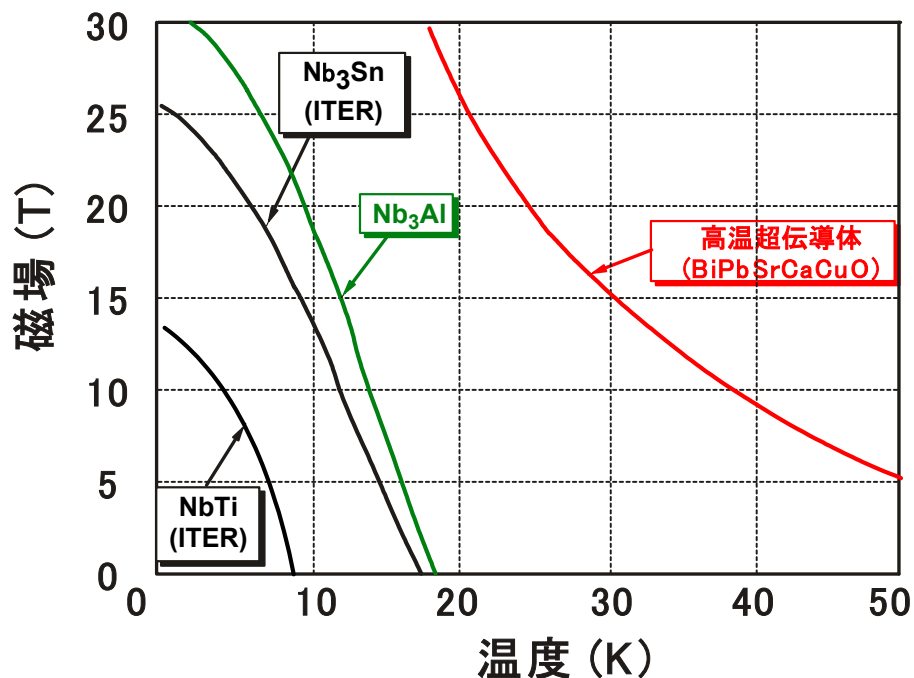
## 急熱急冷法Nb<sub>3</sub>Alの開発課題

- 安定化技術の開発
- 長尺、大量生産技術の開発

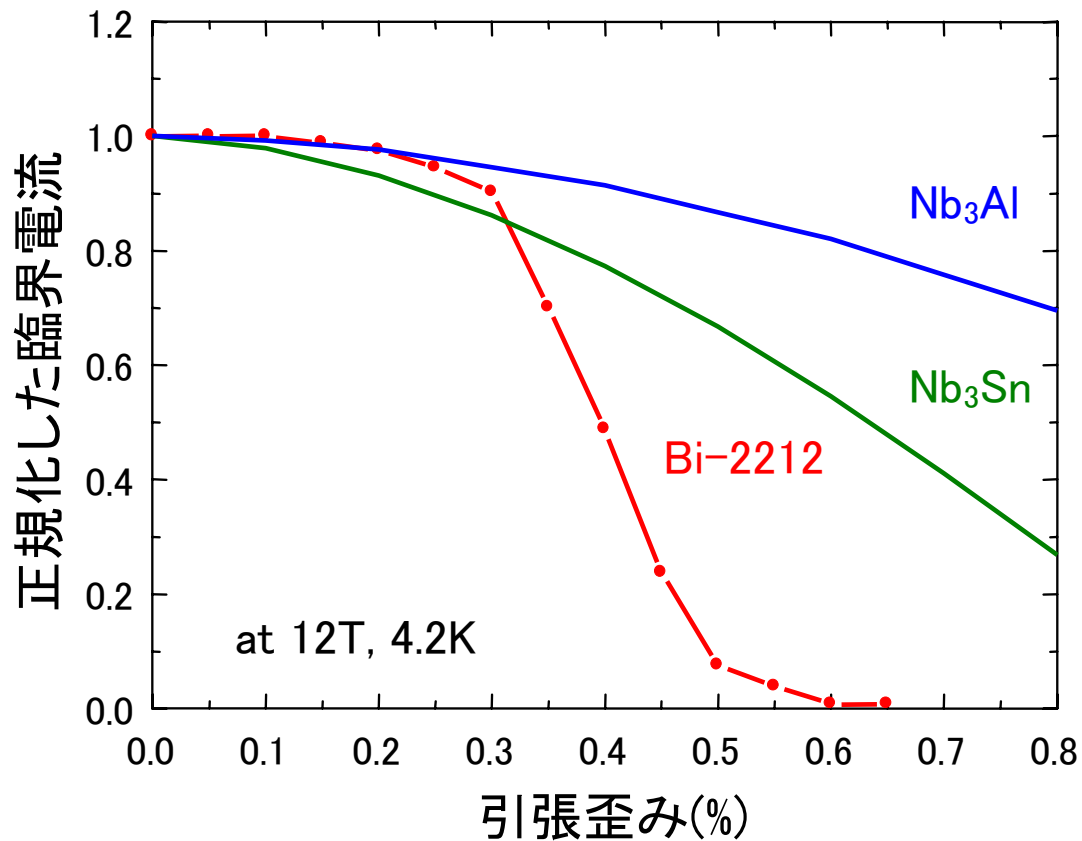
# 高温超伝導体の応用の可能性

4Kより高い温度で動作可能。  
冷凍機の負荷を軽減できる。

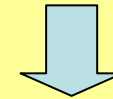
高温超伝導を4Kで使用すると  
20Tを越す強磁場発生が可能。



# 高温超伝導の歪み特性



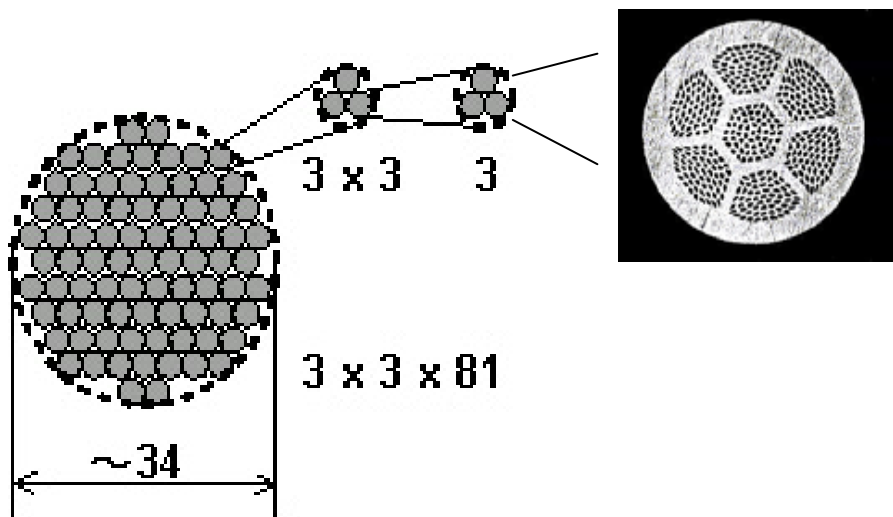
高温超伝導線 (Bi-2212丸線) は、0.3%以上の引張歪みで臨界電流が急激に低下する



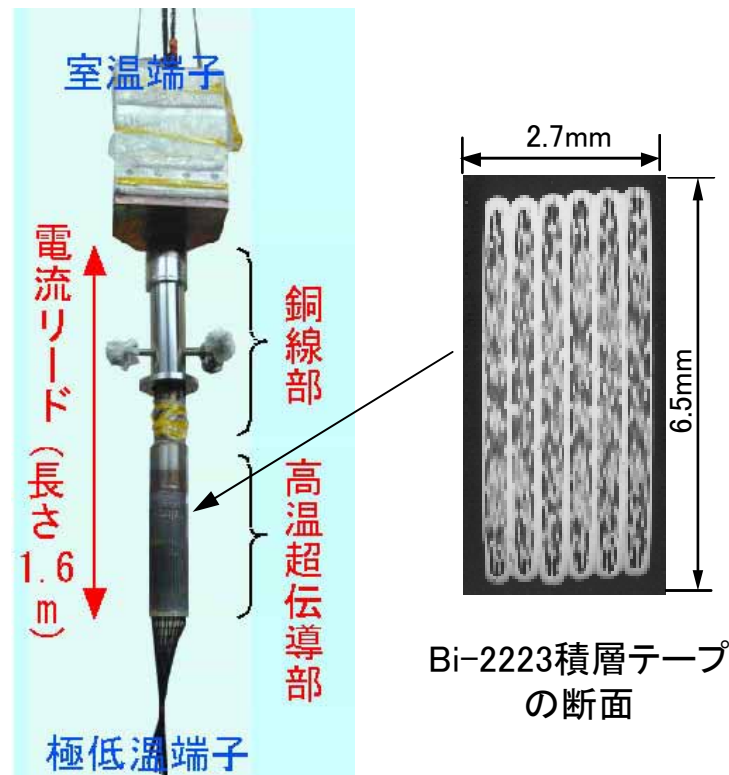
過度な引張り歪みが掛からない導体設計が必要

# 高温超伝導－原研に於ける開発

## ①12T、10kA導体試作 (Bi-2212)



## ②60kA電流リード (Bi-2223)



Bi-2223積層テープ  
の断面

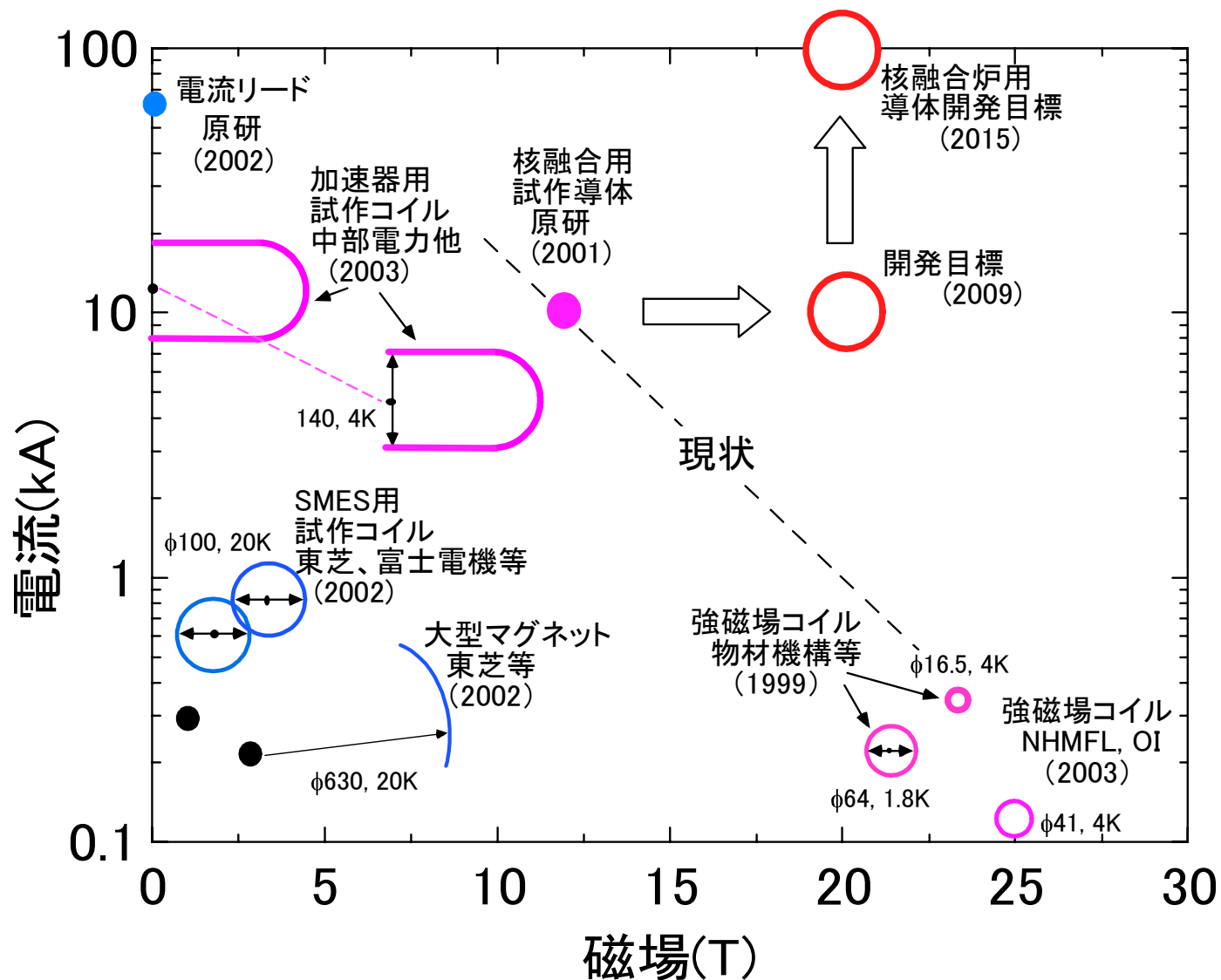
2009年頃までの開発目標

## 20T、10kA導体の開発

- 候補材 Bi-2212, Bi-2223, YBCO
- 大型コイル化できる製作法の開発



# 高温超伝導応用の実績





# 発電実証プラント用コイル開発の技術課題

	ニオブアルミ線材	高温超伝導	開発手段
① 線材の開発			研究機関、産業界との連携による開発
基本的特性の評価、向上 <ul style="list-style-type: none"> <li>臨界電流値 <math>J_c(B, T, \epsilon)</math></li> <li>熱的・機械的特性</li> </ul>	○	◎	
低放射化	—	◎銀の減量(低銀化)	
長尺化	○	◎	
② 導体の開発(大電流化)			●これまで蓄積した解析、シミュレーション技術を有効利用した検討 ●縮小導体、実機導体の製作と性能評価
撚線構造	○	◎	
機械的補強	○	◎	
冷却方式	—	◎	
安定化、クエンチ保護	◎	◎	
交流損失の低減	—	◎	試験コイルの製作と性能評価
③コイル化技術の開発	○	◎	

—現状の技術でほぼ対応可    ○現状技術のさらなる向上    ◎新たな技術開発が必要



# 超伝導コイル開発ステップ（加速案を想定）

