



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

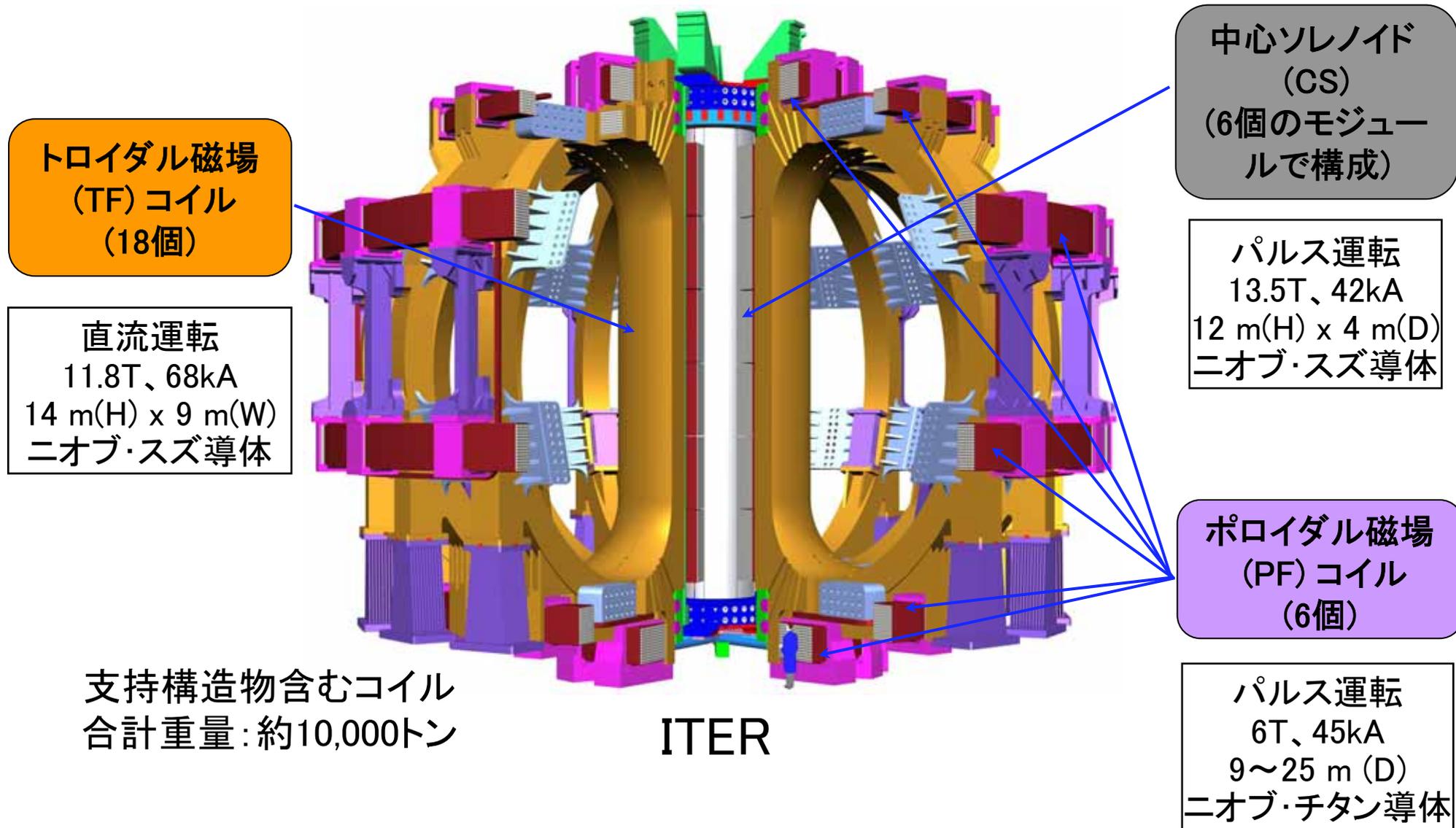
内 容

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



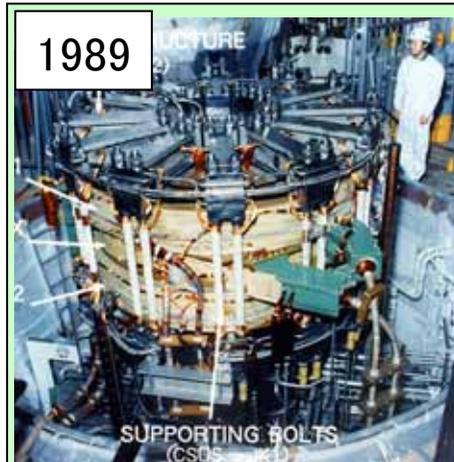
TMC (原研)
12T, 7kA, Nb₃Sn

1987



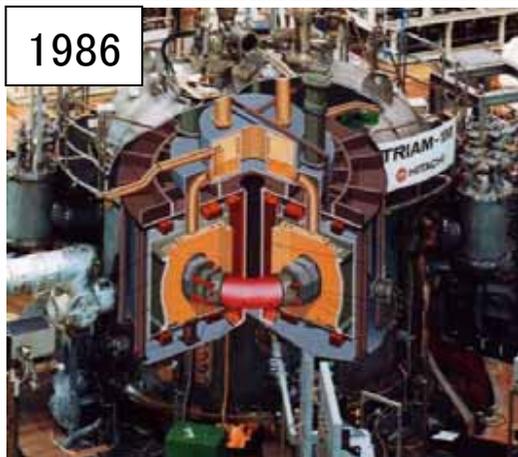
LCT (原研)
NbTi, 9T, 10.8kA

1989



DPC (原研)
Nb₃Sn, 17kA, 7T

1986



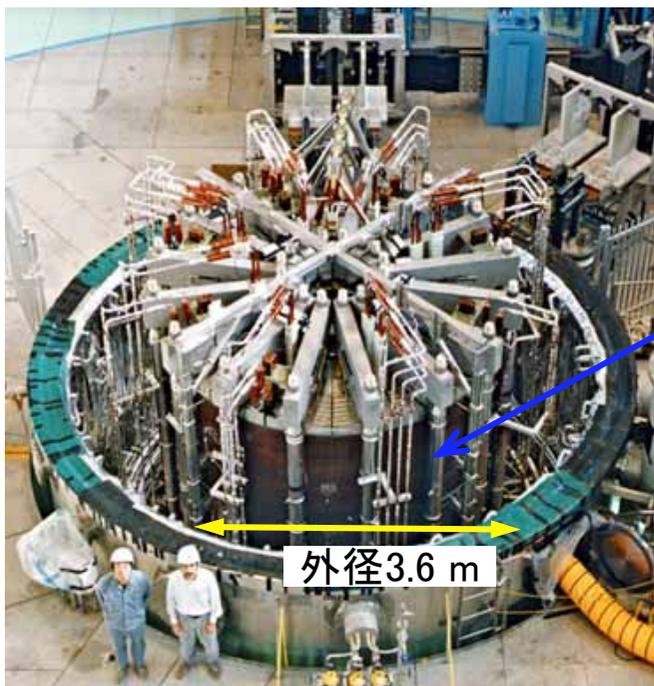
TRIAM-1M (九州大学)
Nb₃Sn, 11T, 6.2kA

1998



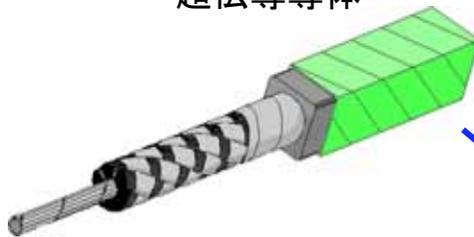
LHD (核科研)
NbTi, 13kA, 7T

ITER超伝導コイルの工学R&Dと開発目標



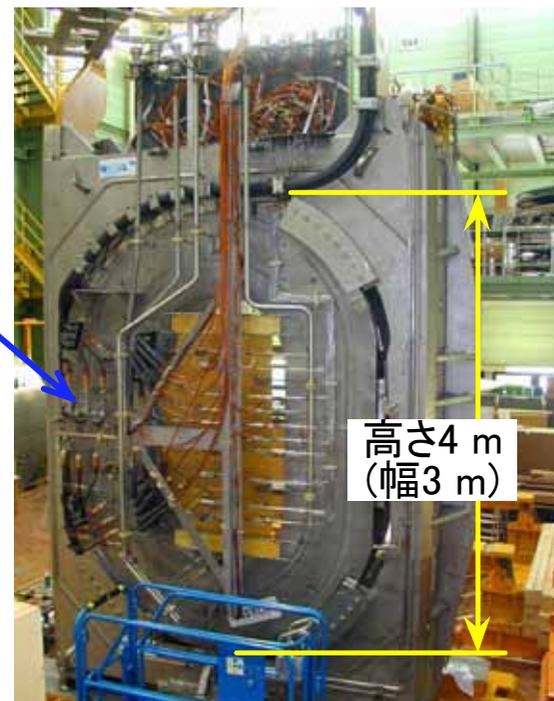
原研の試験装置に据え付けられた
CSモデル・コイル

モデル・コイルに使用された
超伝導導体



開発目標

- 高性能Nb₃Sn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: +0.4T/s、-1.2 T/s

開発目標

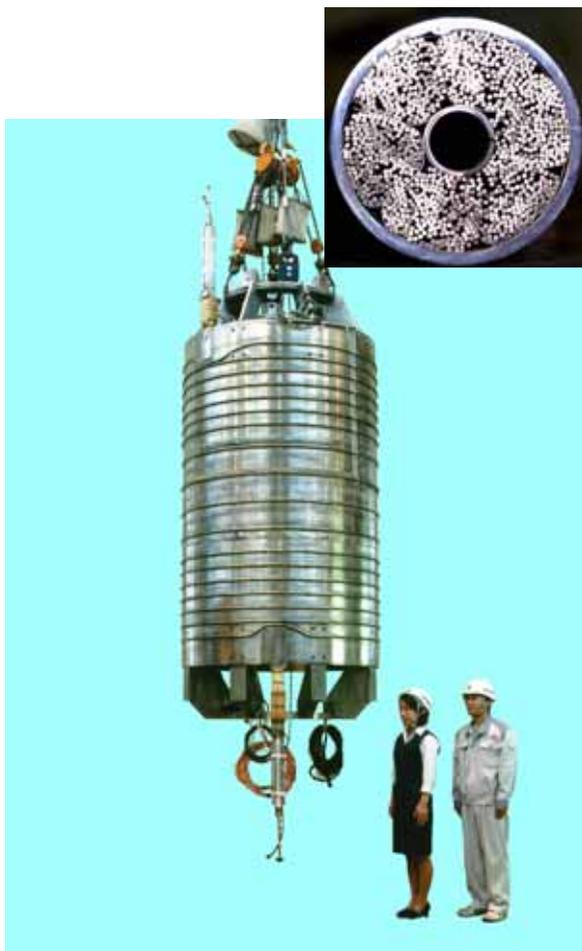
- 実機の約1/3の大きさのコイルを製作
- 実機と同等の電磁力の下で機械的構造、超伝導性能を実証
 - 電流値: 80kA
 - 最大磁場: 10T

ITERで開発した3種類の導体と試験コイル

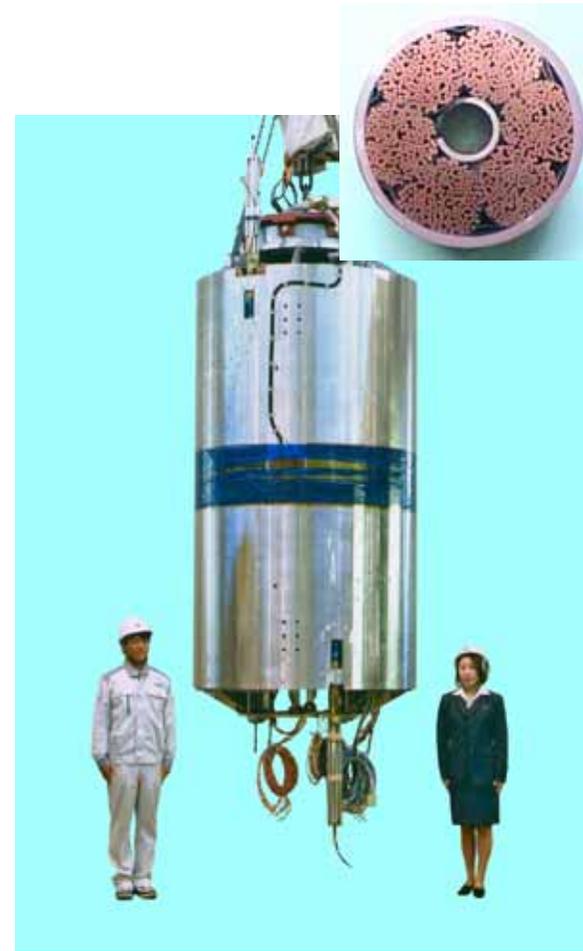
定格13T, 46kA



CS インサート



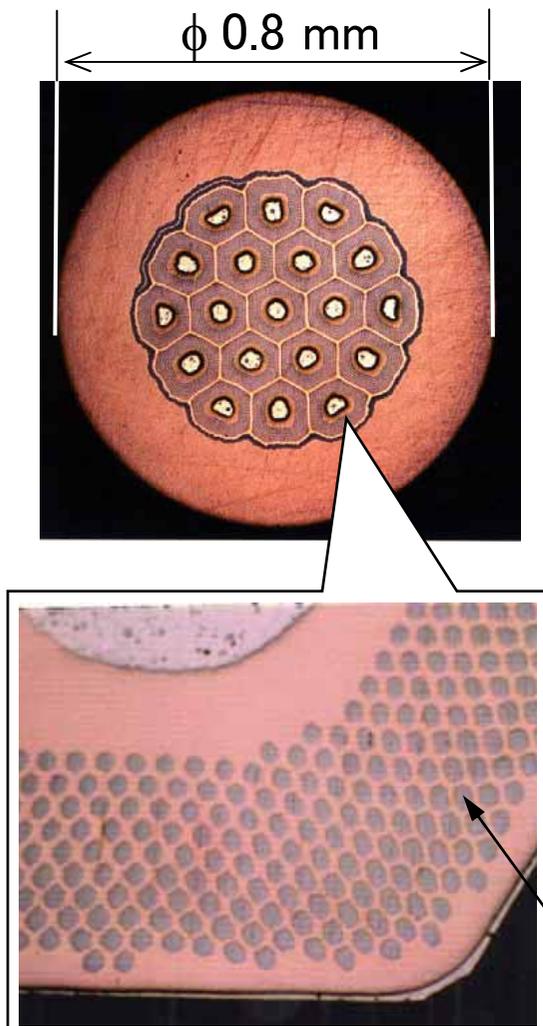
TFインサート



Nb₃Alインサート

ITERで開発された高性能Nb₃Sn素線

Nb₃Sn素線断面(内部拡散法)

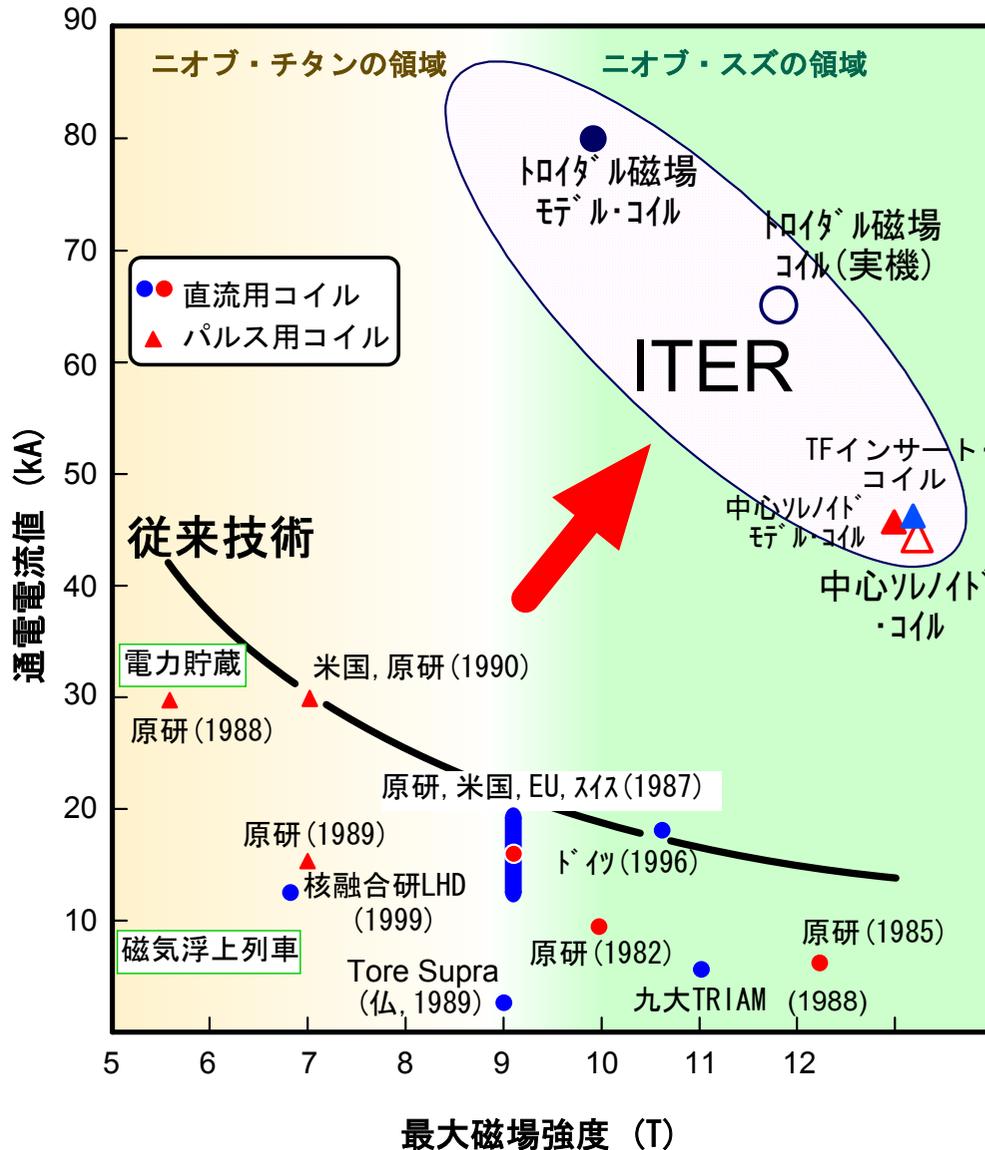


Nb₃Snフィラメント
($\phi 3\mu\text{m}$ 、8,000本)

ITERモデルコイル用として
世界の7社で約29トンのNb₃Sn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 ² 以上 (内部拡散法) 550 A/mm ² 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 ³ 以下 (内部拡散法) 200 mJ/cm ³ 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同時に、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。



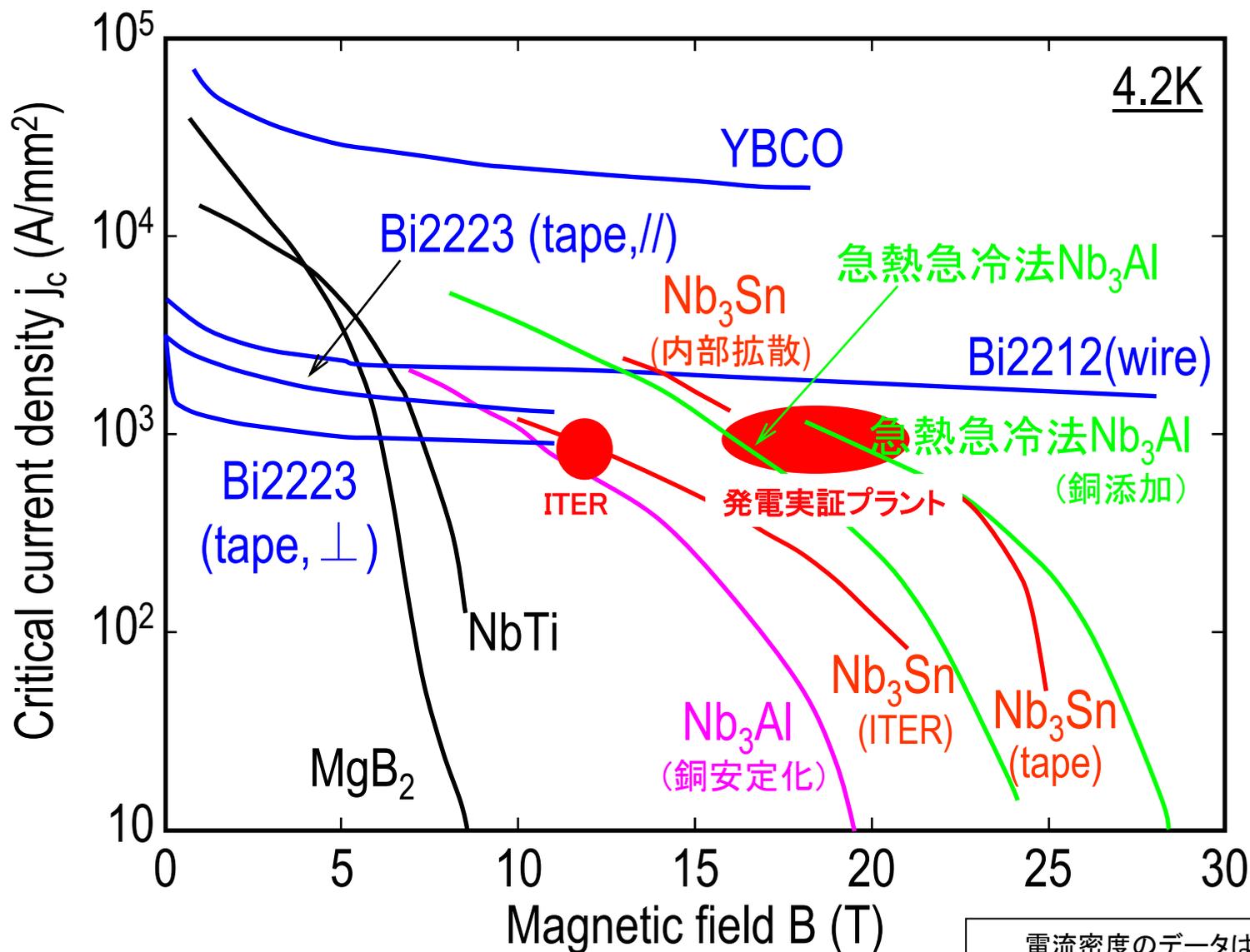
ITER超伝導コイル建設に必要な大型化、高磁界化を達成

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 ²	800 A/mm ²
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 ²² ~10 ²³ n/m ² (暫定値)	10 ²² n/m ²

*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

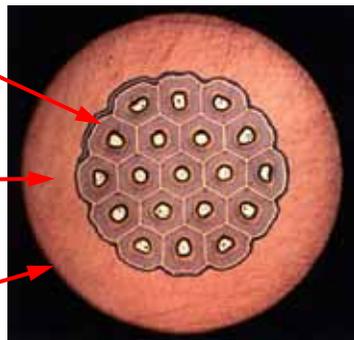
- ⑦ 銅部の増加(銅線を入れる)
(安定化銅の寄与も考慮)

超伝導フィラメント

①、④

安定化銅 ②

クロムメッキ ⑥



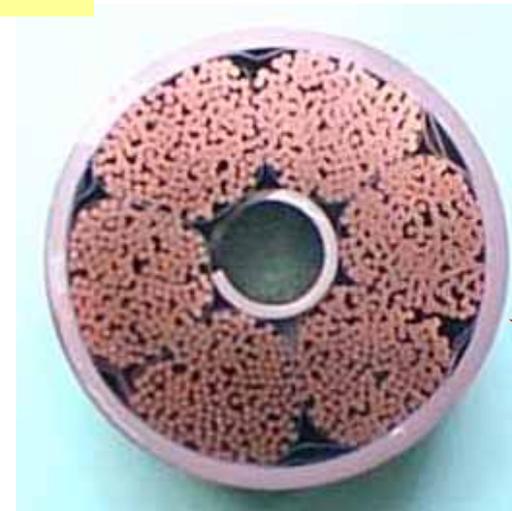
超伝導素線

③、⑤

素線、銅線を束ねる
(約1,000本)

⑦

銅線

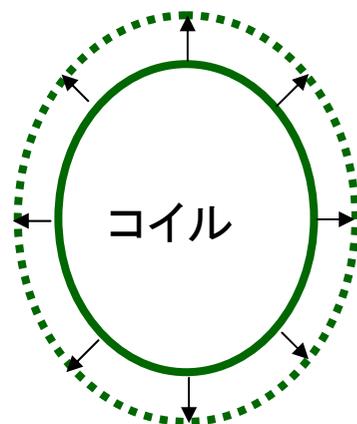
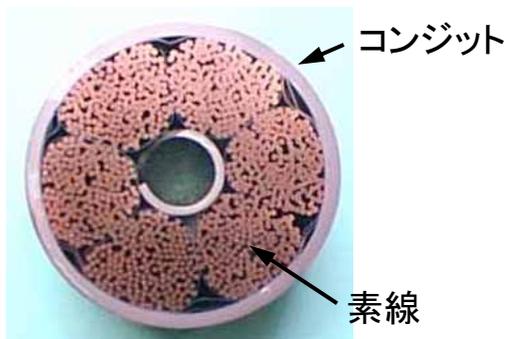


コンジット

- 機械的補強
- ヘリウム容器

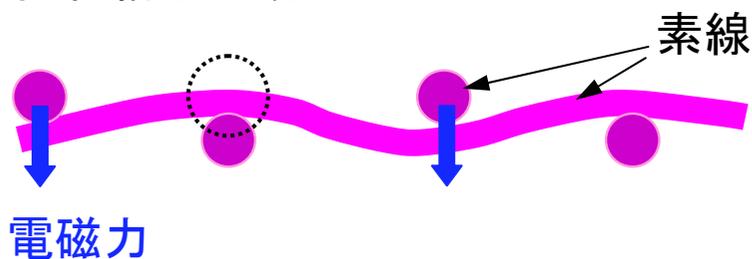
導体設計で考慮すべき項目②－歪の影響

- 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



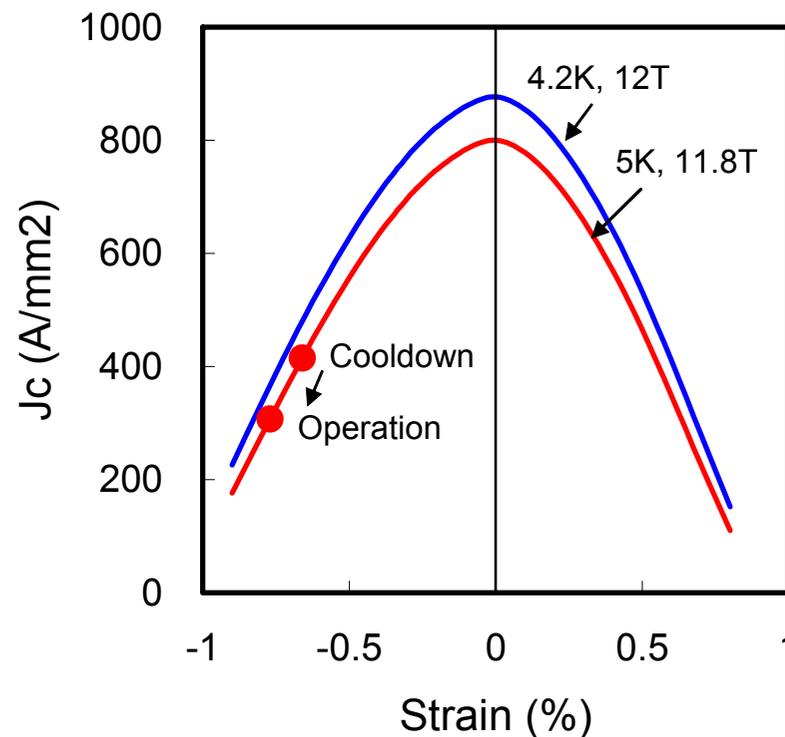
- ② 電磁力(拡張力)によるコイル全体の变形

- 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(Nb_3Sn)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)

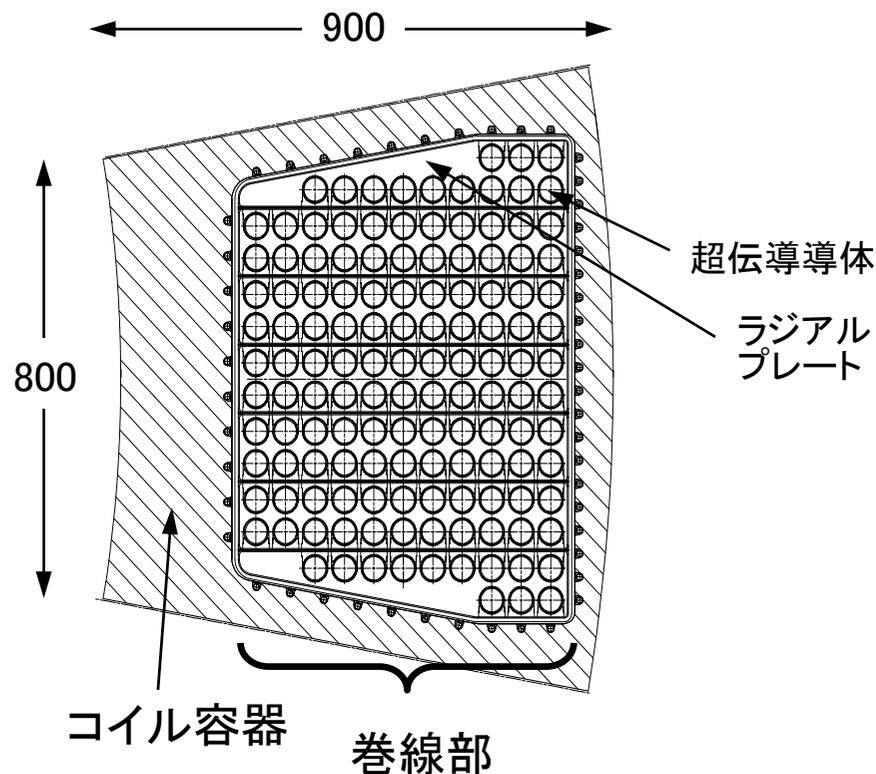
②コイルに加わる電磁力が約2～3倍に増加

- 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

Nb₃Al導体の特徴

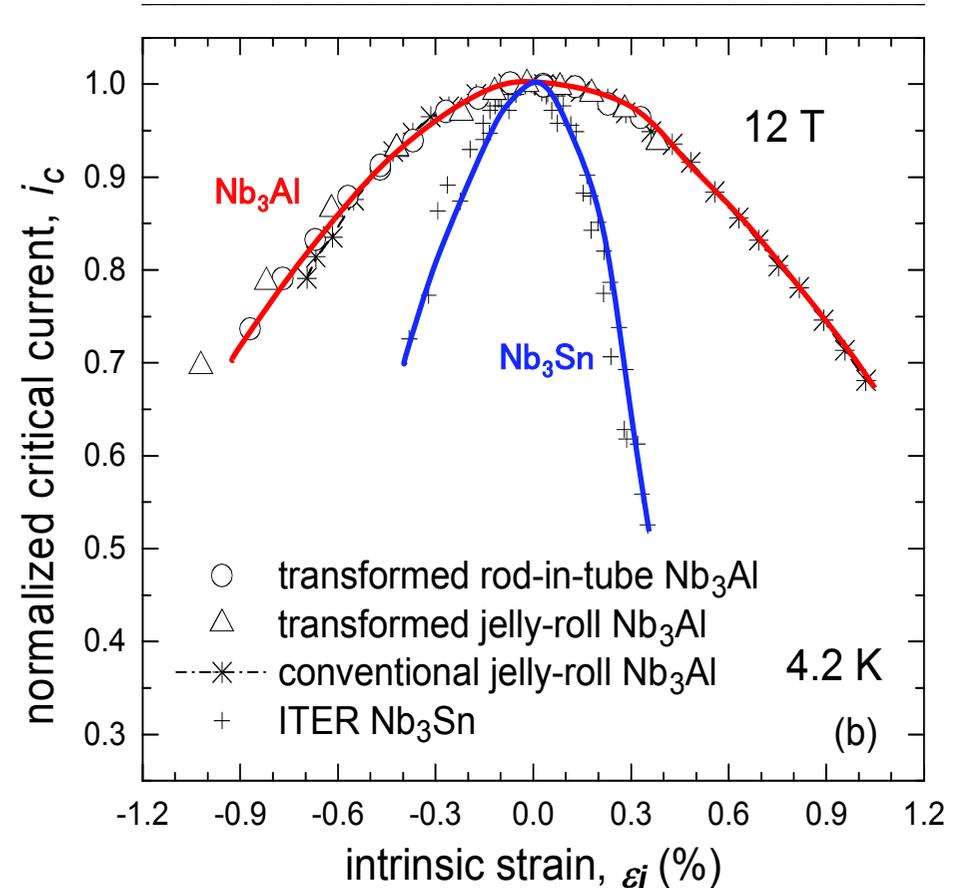
Nb₃Al導体

特徴

- 臨界磁場がNb₃Snより高い。
- 歪による臨界磁場と臨界電流値の低下はNb₃Snより極めて小さい。

現状

- 12T用Nb₃Al導体の開発は完了。コイル化の技術も実証(銅安定化Nb₃Al)。
- 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。

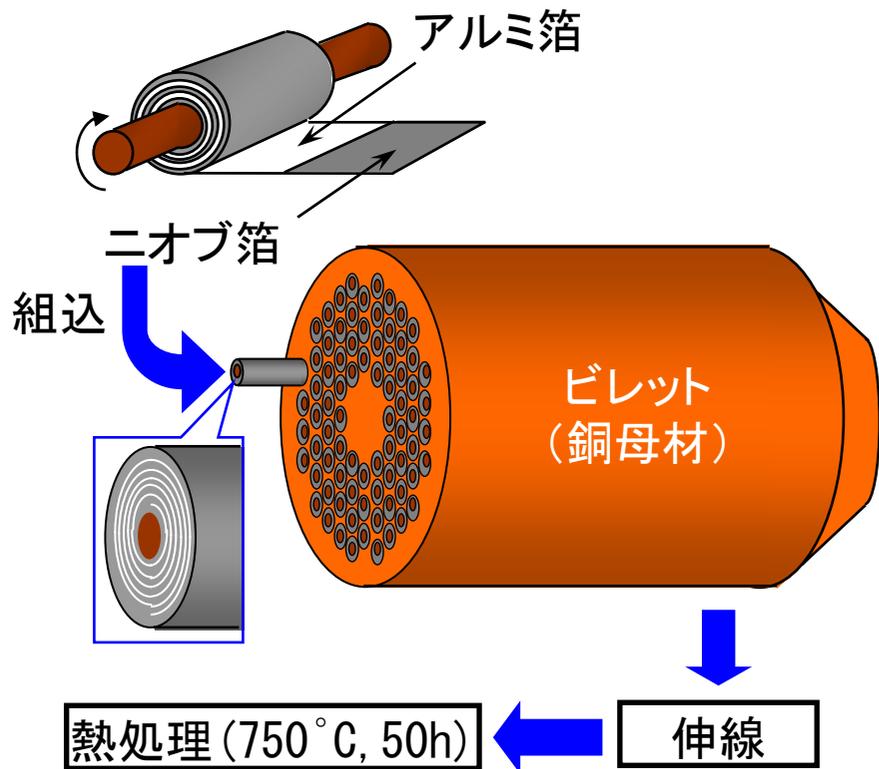


Nb₃Al素線の製作法

銅安定化Nb₃Al(原研)

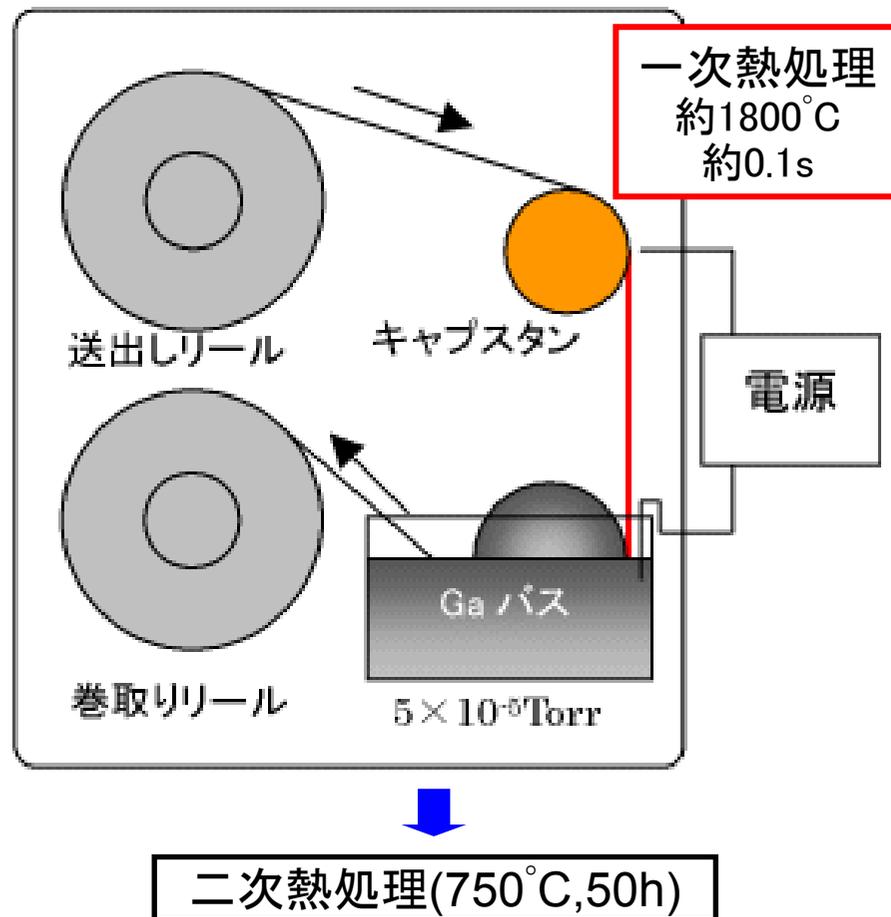
課題: 従来のNb₃Al生成熱処理(1200°C以上)では安定化銅(融点1100°C)が溶解。

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

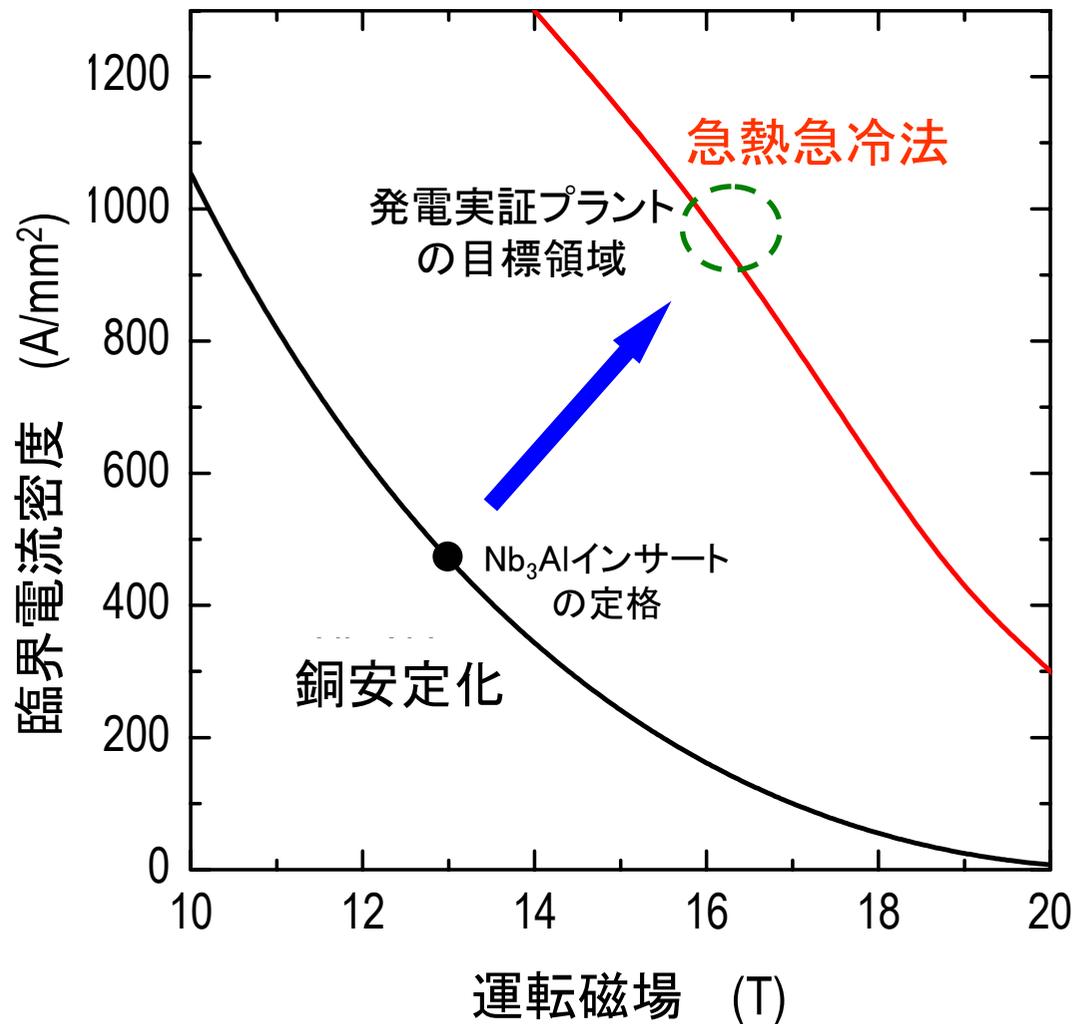


急熱急冷法Nb₃Al(物材機構)

ビレット: 銅母材 => ニオブ母材



Nb₃Alの現状と課題



急熱急冷法Nb₃Alの成果

- 高磁場で高臨界電流密度を得た (B=16T、J_c=1000A/mm²以上)
- 単長300mまで長尺化に成功

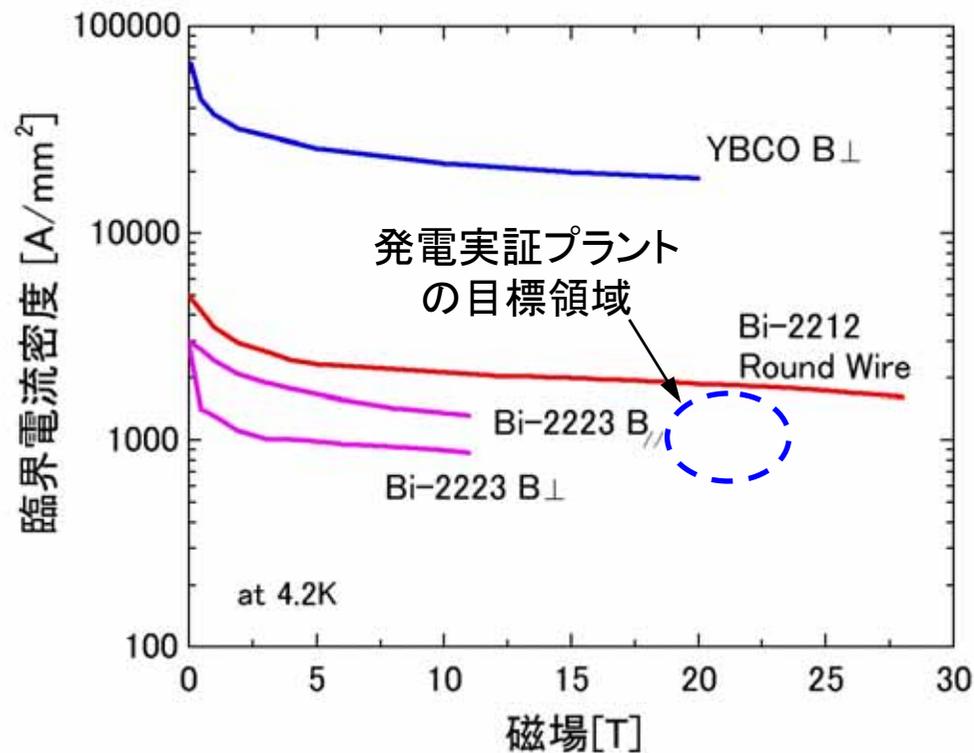
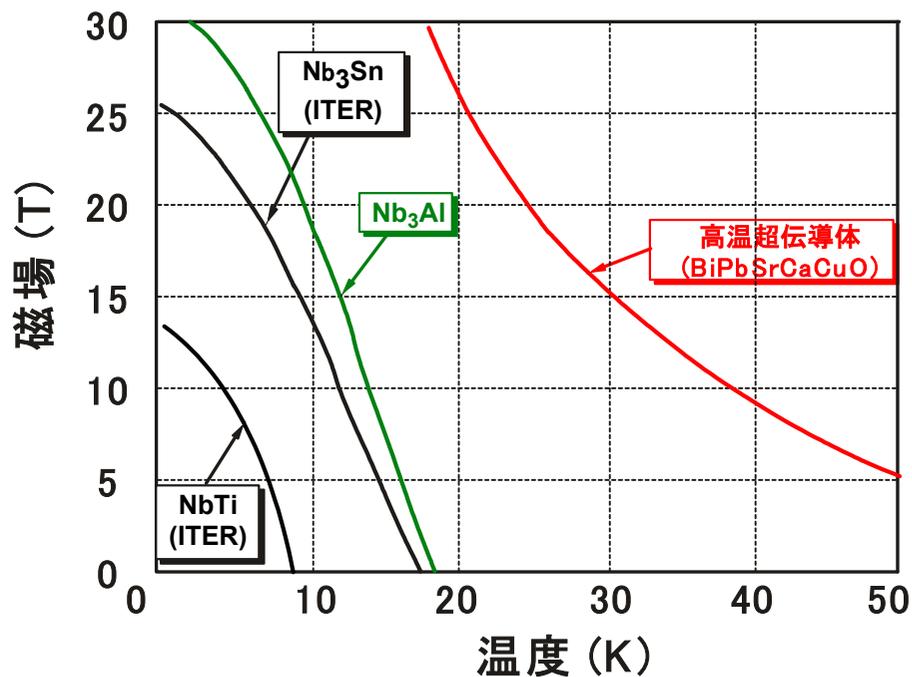
急熱急冷法Nb₃Alの開発課題

- 安定化技術の開発
- 長尺、大量生産技術の開発

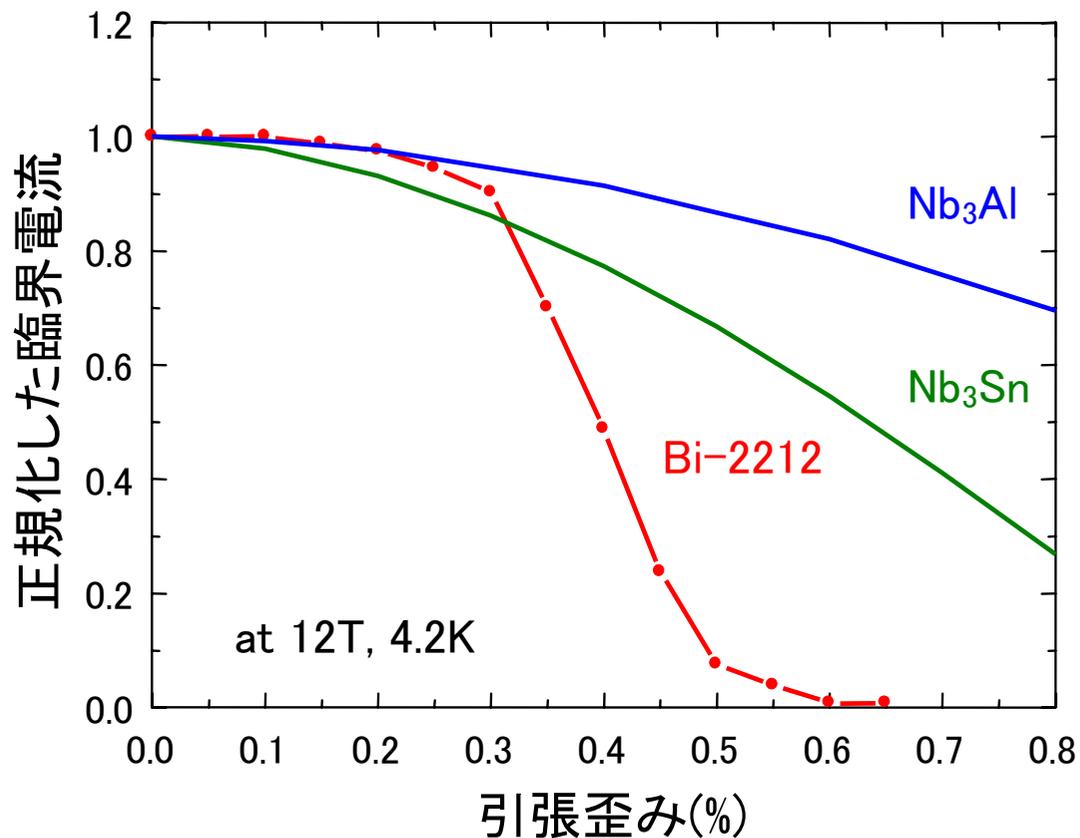
高温超伝導導体の応用の可能性

4Kより高い温度で動作可能。
冷凍機の負荷を軽減できる。

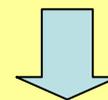
高温超伝導を4Kで使用すると
20Tを越す強磁場発生が可能。



高温超伝導の歪み特性



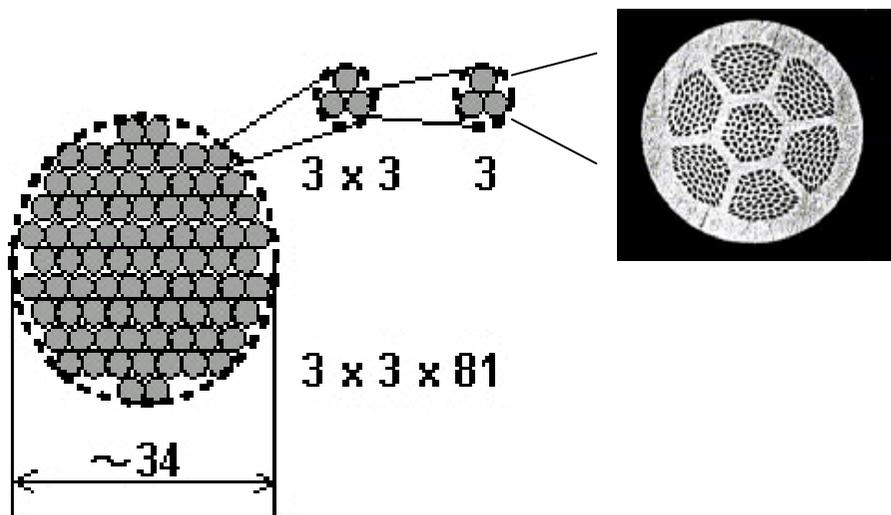
高温超伝導線 (Bi-2212丸線) は、0.3%以上の引張歪みで臨界電流が急激に低下する



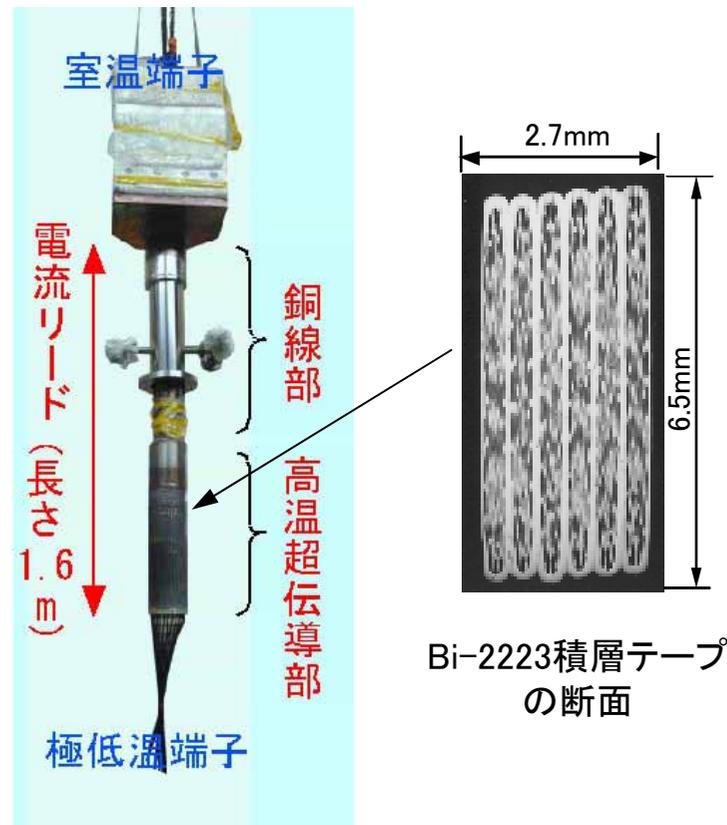
過度な引張り歪みが掛からない導体設計が必要

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)

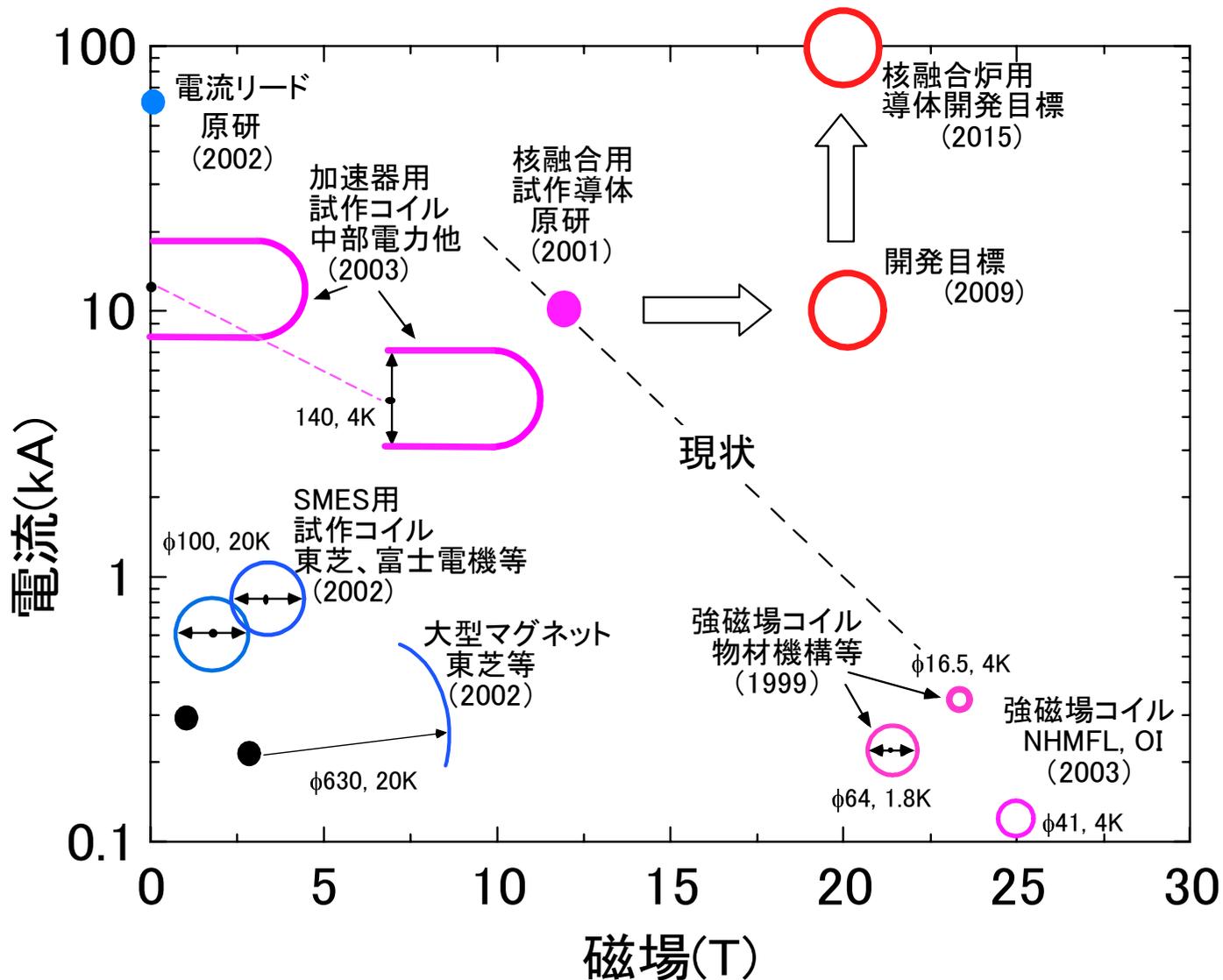


2009年頃までの開発目標

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 ● 臨界電流値 $J_c(B, T, \epsilon)$ ● 熱的・機械的特性	○	◎	
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	—	◎	
③コイル化技術の開発	○	◎	試験コイルの製作と性能評価

—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）

年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
高温超伝導技術	基礎的開発												高性能化・大電流化						大型コイル化						プロト製作		発電実証炉 マグネット製作					
	①素線 - 基本的性能の把握と性能向上 ②導体 - 大電流化のための基本構造検討 (10kA, 20T)												①素線 - 高電流密度化 - 低銀化・非銀化 ②導体 - 大電流化(100kA) - 高強度化						①線材量産技術の確立 ②モデル・コイルの製作						第0号機による製作実証							
	基本仕様の策定												導体の選定						仕様の確定													
													高温超伝導 または ニオブアルミ の二者択一						YES													
ニオブアルミ超伝導技術	高性能化のための基礎的研究												高性能化						大電流化						プロト製作		発電実証炉 マグネット製作					
													①安定化技術 ②高電流密度 (1000A/mm ² 、16T、4.5K) ③線材量産化						①大電流化 (100kA) ②実機サイズ導体による性能評価						第0号機による製作実証							
													導体の選定						仕様の確定													
													開発中止						NO								長期的展望に基づいた開発					