

課題No. 32:
**原型炉マグネット –高電磁力と
冷却安定性+高効率化–**

今川信作

2030年頃までの核融合開発

<ITER> 2035年のDT実験に向けてH, D実験と機器整備

- ◆ 組立, 試運転, DT運転準備(加熱, 計測の機器開発を含む)
- ◆ ITER-TBM2号機(T増殖, 熱エネルギー取り出し)の製作

<原型炉>

概念設計から工学設計に移行

- ◆ 材料(低放射フェライト鋼, 低温構造材料, 絶縁材料など)と超伝導線材は開発を完了し, 量産化技術開発の段階
- ◆ ダイバータとブランケットは, 方式や構成を決定し, 詳細設計段階
- ◆ マグネットは, モデルコイルによる技術実証の段階

ITERと原型炉の実施主体はQST。実機製作は企業の役割。
NIFSと大学はどのような役割を果たすか?

ITERの成果(失敗を含む)を原型炉に活かすためには理解が重要

DEMO-TFコイルの概念設計

第21回核融合科学技術委員会の資料4より引用



1. 超伝導コイル

トロイダル磁場コイル概念

- ITER方式を採用し、超伝導コイル設計のベースラインを構築

超伝導線材: Nb₃Sn

導体構造: ケーブルインコンジット

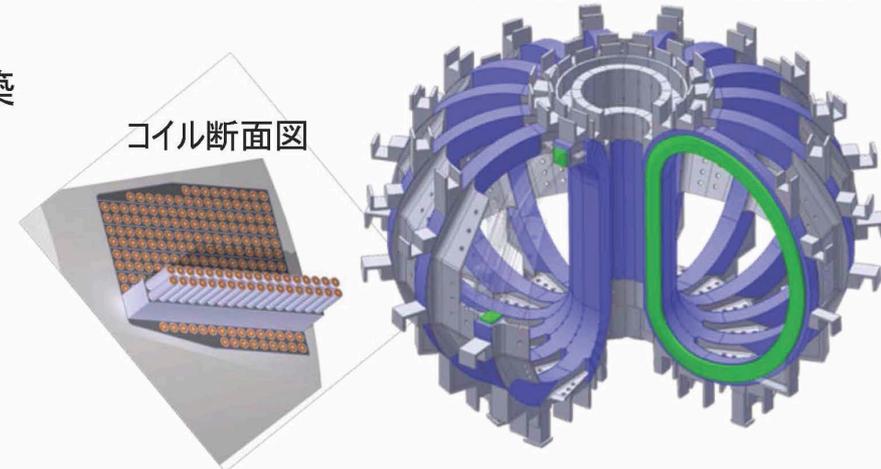
巻線方式: ラジアルプレート、ダブルパンケーキ

- 補正磁場コイルによる製作公差を緩和
- クエンチ時の放電時定数評価(共同研究)

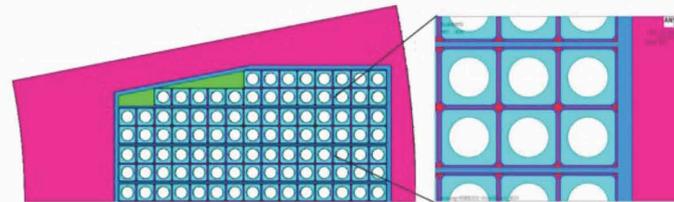
矩形導体を用いた概念検討

- 製作性簡略化やコスト低減を考慮した副案の検討に着手
- 矩形導体方式によるラジアルプレートを用いない概念
 - ✓ 導体絶縁材の応力低減が課題
- コイルケース最適化、長方形ジャケットの採用により、**切断応力を大幅に低減**

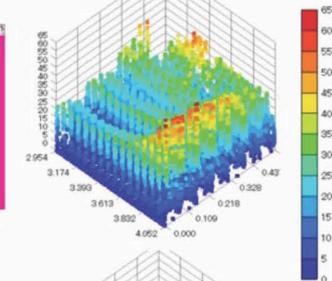
トロイダル磁場コイルの概念図



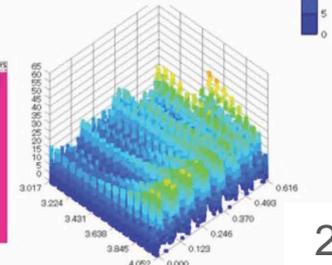
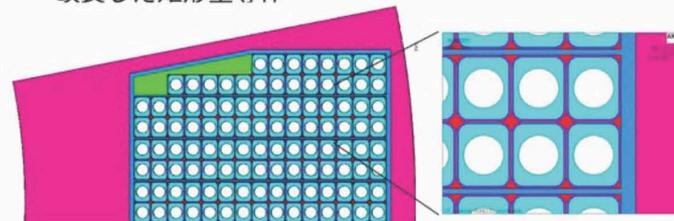
従来の矩形型導体



ターン絶縁材の層間剪断応力分布



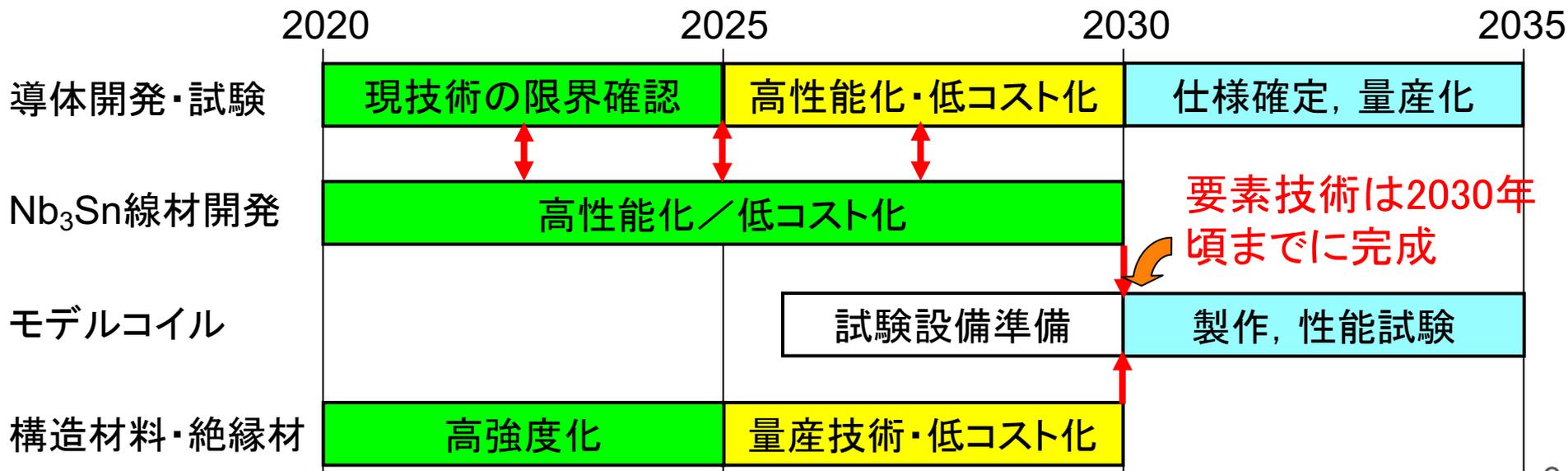
改良した矩形型導体



超伝導マグネットの開発計画

- ◆ 原型炉マグネットは、ITERより電磁力が1.5倍 (68 kA@11.8 T→83 kA@14 T), かつ, 大型化するため, 高強度化と冷却強化が必須。
- ◆ 2030年頃までに、モデルコイルによる性能実証に向けて、導体および絶縁材料・構造材料の開発を完了させる必要がある。
- ◆ 電磁力による超伝導特性の劣化, 電磁力による絶縁物の破壊など, **理解が十分でない重要課題が残っている。**

NIFSと大学には、学術面からの貢献が期待されており、また、最先端研究の実施による人材育成も重要な役割である。



原型炉マグネット用Nb₃Sn導体の課題

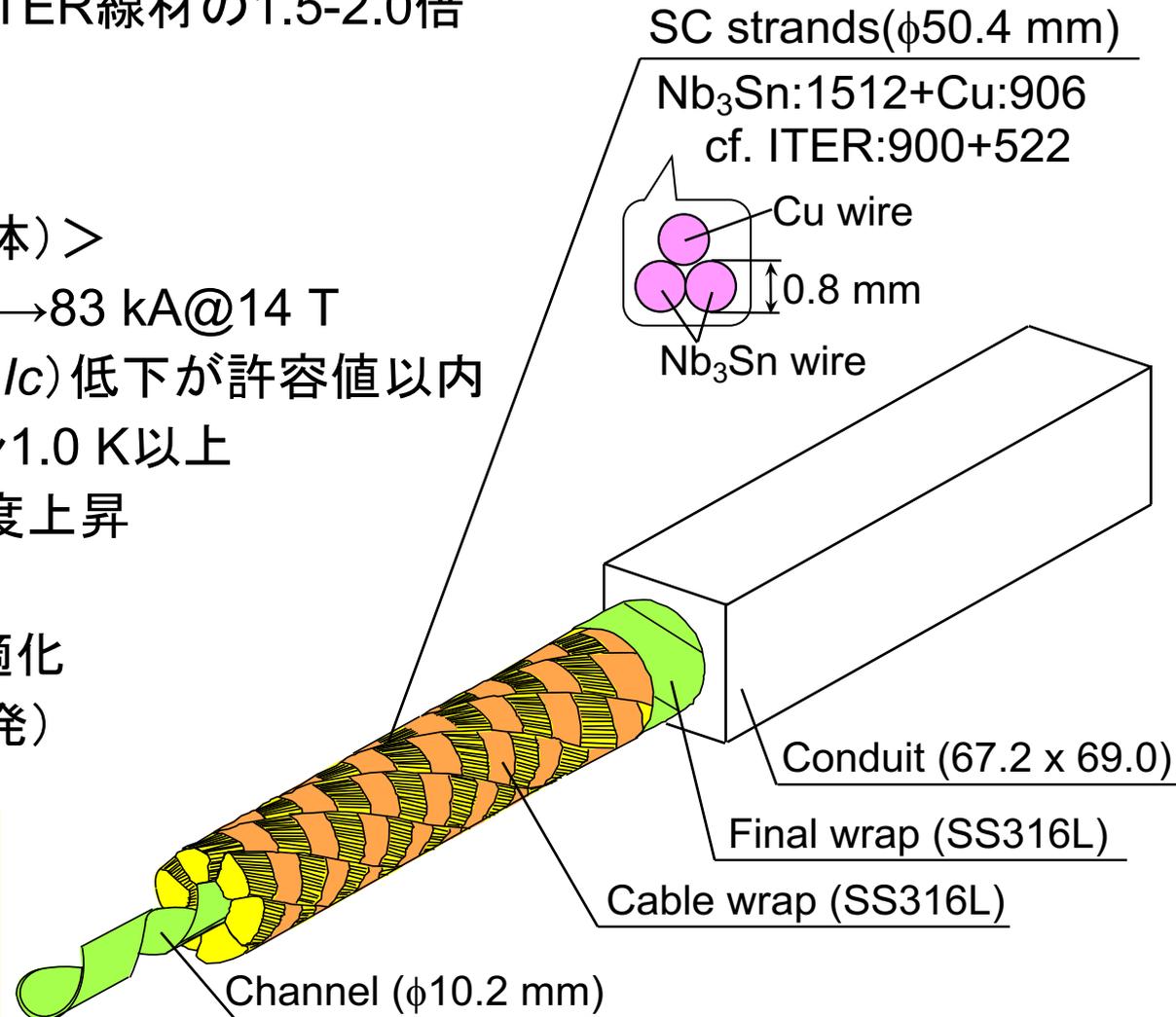
<Nb₃Sn線材>

- (1) 高い臨界電流密度(j_c): ITER線材の1.5-2.0倍
- (2) **高強度化**
- (3) 低コスト

<導体(Cable-In-Conduit導体)>

- (1) 大電流化: 68 kA@11.8 T → 83 kA@14 T
- (2) **耐電磁力特性**: 臨界電流(I_c)低下が許容値以内
- (3) **冷却安定性**: 温度マージン1.0 K以上
- (4) クエンチ保護時の許容温度上昇
- (5) 交流損失の低減
- (6) 撚りピッチ・ボイド率の最適化
- (7) ジャケット材料の選択(開発)

まず、ITERで採用された短い撚りピッチ(STP)で実規模導体を製作し、繰り返し励磁と熱サイクル試験を行う



(数値は、原型炉設計特別チームの検討資料より)

原型炉マグネットの課題

<巻線(コイルパック製作)>

- (1) **巻線方式の選択**(ラジアルプレート方式か厚板ジャケット方式か)
- (2) 高強度の耐放射線性絶縁材料(ITER以上の強度)
- (3) **絶縁材料の許容応力基準**の確立
- (4) ラジアルプレート方式の場合, 製作コスト削減
- (5) 高精度巻線技術の拡張

<一体化>

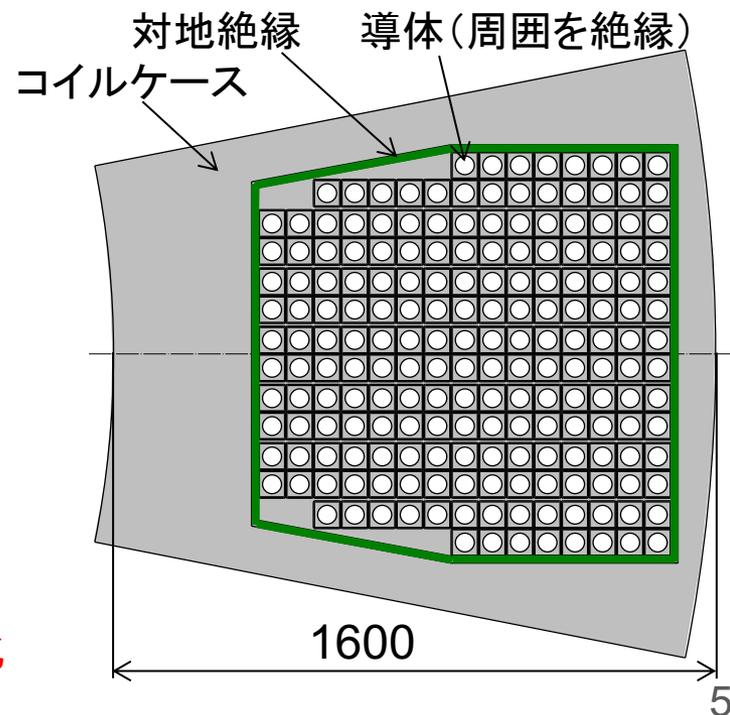
- (1) 高強度低温構造材料:0.2%耐力を1.2倍
- (2) 大型・厚板構造物の製造技術
- (3) 大型構造物の高精度加工・溶接技術
- (4) 高強度の耐放射線性絶縁材料(対地絶縁)
- (5) 大型構造物の高精度組立技術
- (6) **侵入熱・発熱の低減, 冷凍システムの高効率化**

<Stress of coil case>

$$P_m \propto B^2 R_0 a_{TF} / A_{SS}$$

$$\frac{13.9^2 \times 8.5 \times 51.8 / 1.47}{11.8^2 \times 6.2 \times 34.1 / 0.58} = 1.14$$

構造物の許容応力はITER
の**1.2倍**を要請



原型炉マグネットに関する学術的課題

<Nb₃Sn線材> →新製法の提案

- (1) jc向上法の探索: Nb₃Sn反応促進, 添加元素の探索, 熱処理最適化
- (2) 必要強度の理解と高強度化手法の探索: 内部補強, 表面粗さ制御
- (3) 線材コストの分析と低コスト化の探索: 高jc化とのバランス

<導体>

- (1) 電磁力による劣化機構の理解(撚り線のひずみ評価)
→ ジャケット材の選択, 撚りピッチとボイド率の最適化
- (2) CIC導体の冷却安定性の理解(温度マージン, 許容温度上昇)
→ 表面処理の最適化, 温度マージンの低下, 安定化銅の削減

<巻線・一体化>

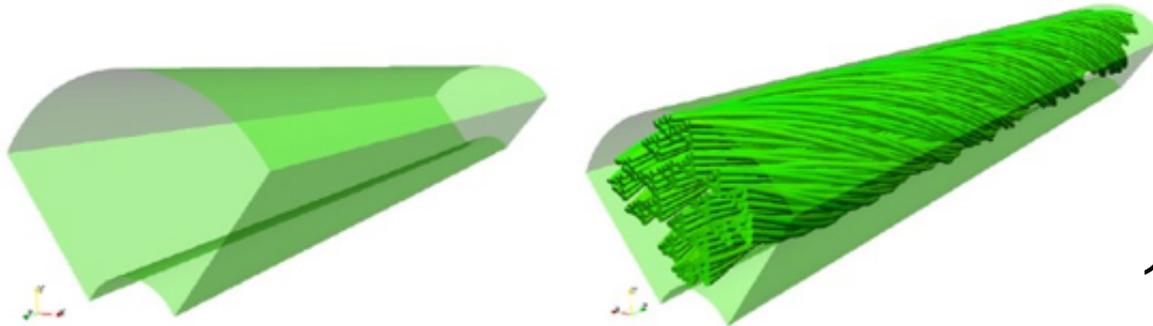
- (1) 絶縁材料の放射線による強度劣化機構の深い理解 →新材料の提案
- (2) 絶縁材料の放射線による絶縁性能劣化機構の理解 →新材料の提案
- (3) 絶縁材料の許容応力基準の確立: 層間せん断応力だけで良いか?
- (4) 高強度低温構造材料の探索: 高Mn鋼, 高Cr鋼 →新材料の提案
- (5) 冷凍システムの電力消費の分析と削減策の探索

CIC導体の電磁力による劣化機構(一例)

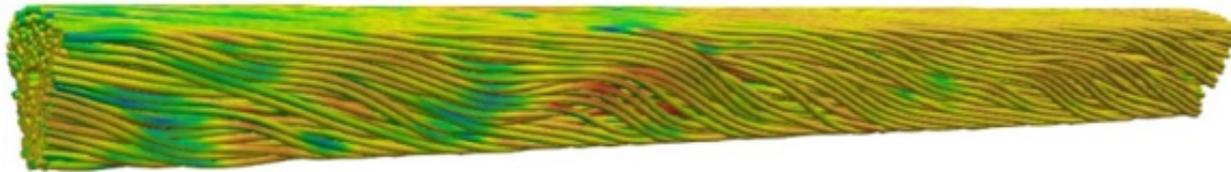
The mechanical model

The model is based on the MULTIIFL code, which solves the mechanical equilibrium among hundreds of multi-twisted strands [1]-[3][6].

R. Riccioli, *et al.*,
ASC2020



1/6 of ITER-TF conductor



Thanks to this code, it is possible to find the local strain map over the strands and consequently to know the critical current density map on the strands.

ITERでのTF導体の繰り返し通電と冷却サイクルによる特性劣化の解明を目指し、有限要素法による構造解析に着手。各素線は簡易モデル(断面変形は考慮できない)。実験結果の定性的な説明に成功しているが、定量評価は今後の課題。

解析モデルの更なる詳細化は得策ではない。別の評価手法を検討したい。

研究実施体制(2030年頃まで)

実規模導体試験
小型コイル試験
(新設備)

モデルコイル試験
(新設備)

QST六カ所研
原型炉設計特別チーム

設計取り纏め, 構造材料の評価,
大型R&Dの実施

共同研究・
受託研究

共同研究・
受託研究

NIFS

大学(東北大, 上智大,
大阪大, 福井工大 他)

物材機構

実験結果の分析と解析
線材と絶縁材料の試作・
試験・評価

企業

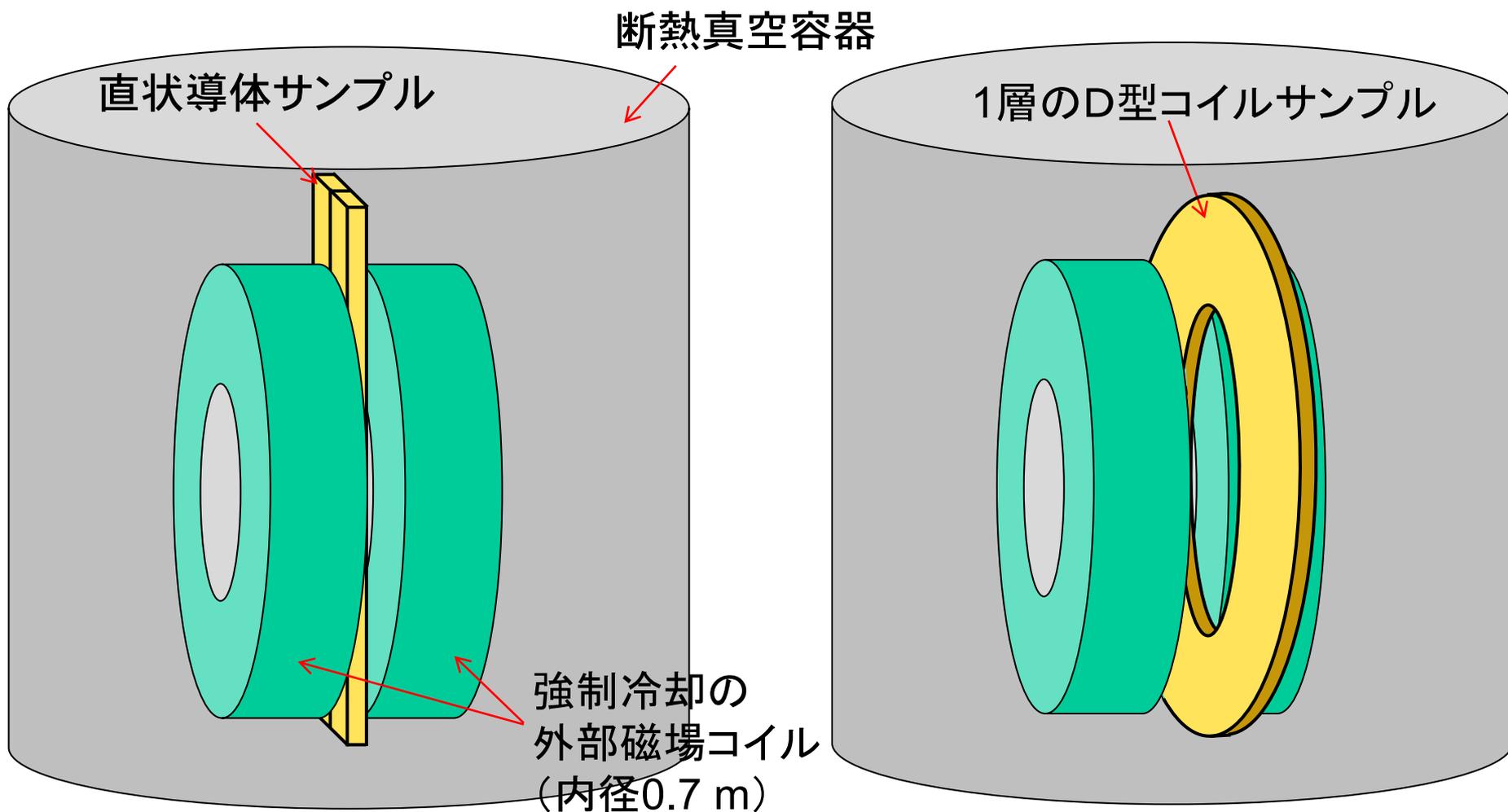
(三菱, 東芝, 日立
古河電工, JASTEC,
有沢製作所 他)

共同
研究

工学設計, 実規模導体試作
構造材料の試作, モデルコ
イル製作

LHD設備を再利用する導体試験装置(提案)

- ◆ LHDのヘリウム冷凍機と6台の超伝導コイル電源を利用して, 原型炉マグネット用の導体試験装置(14 T, 90 kA)を液化機室に整備。直状導体だけでなく, コイル形状サンプルを用いた絶縁物の実環境試験を可能とする。



ユニットテーマ提案(まとめ)

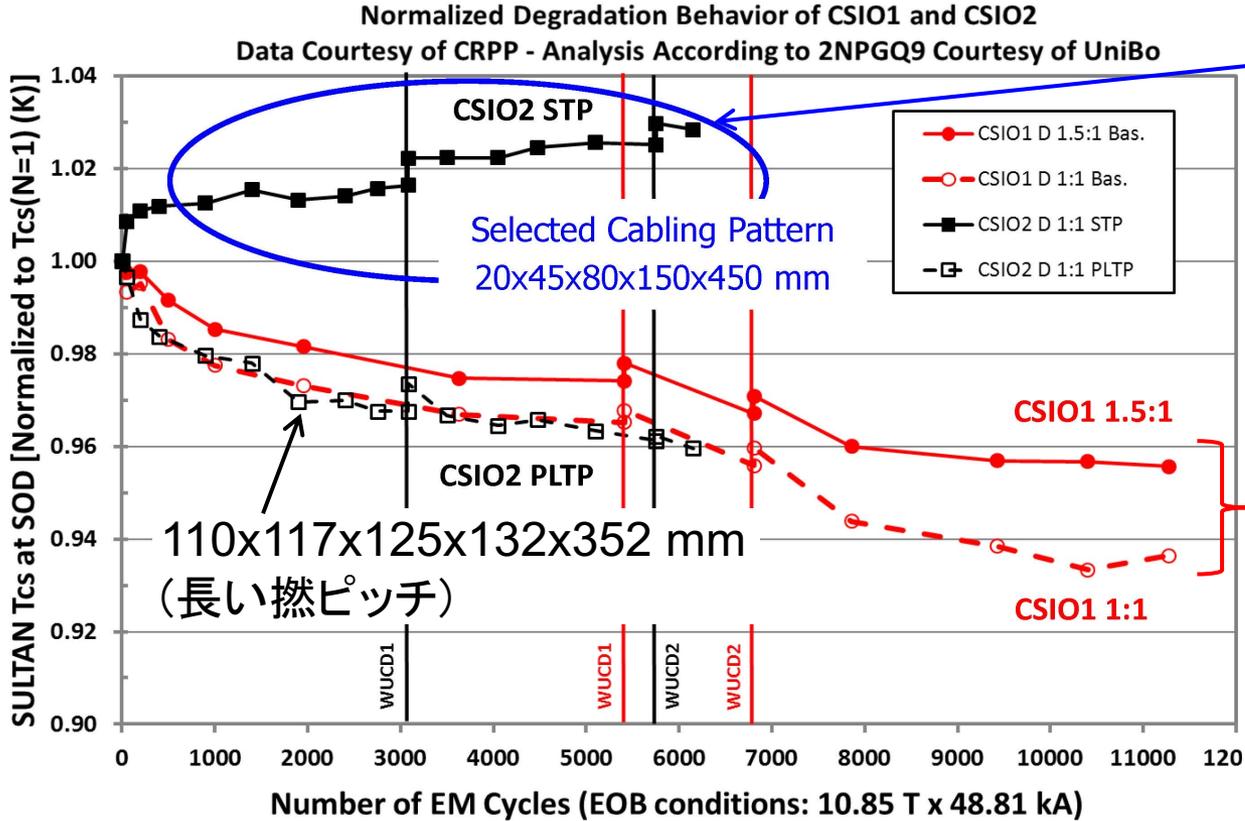
- ◆ 原型炉マグネットの製造技術は、ITERの成果を基に2030年頃までに完成することが求められている。
- ◆ 超伝導線の電磁力による性能劣化機構，強制冷却導体の冷却安定性の限界，絶縁物の許容応力の基準など，学術的な重要課題が残っている。
- ◆ 核融合炉の発電コストの観点からマグネット冷凍システムの消費電力削減も重要課題である。
- ◆ NIFSは大学と共に学術的な課題の解決に取り組むことで原型炉開発に貢献するとともに原型炉・商用炉を担う若手研究者・技術者を育成する。

研究資金，研究者(学生)を増やすには，研究課題の一般化(他分野の研究者が共感できる研究課題として表現)が必要

研究成果の波及効果

- ・Nb₃Sn線材の低コスト+高 j_c 化+高強度化
 - React & Wind法の適用で, MRIや磁気浮上列車に波及
 - ・ガラス積層絶縁材料の許容応力基準の確立
 - 複合材料(航空機材料, 自動車)の許容応力規格への貢献
 - ・低温構造材料の高強度化設計の確立
 - 液化ガス用低温容器への波及
-
- ・電磁力による超伝導特性劣化機構の解明
 - 多数の複合材料(SC線材)の非線形(塑性変形+滑り)問題
新しい構造解析手法を開拓
 - ・CIC導体の冷却安定性の理解, 安定性解析手法の高度化
 - 超伝導工学の進歩

ITERのNb₃Sn-CIC導体の重要課題

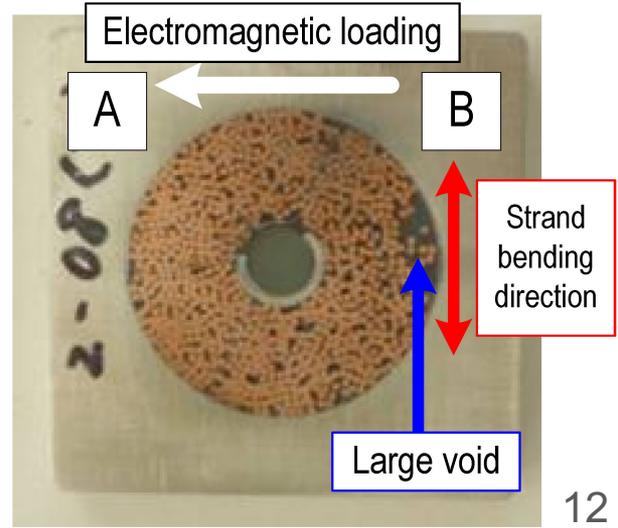


20x45x80x150x450 mm
(STP: 短い撚りピッチ)

T_{cs}: 分流開始温度
(抵抗が現れる温度)
I_c: 臨界電流
(抵抗が現れる電流値)

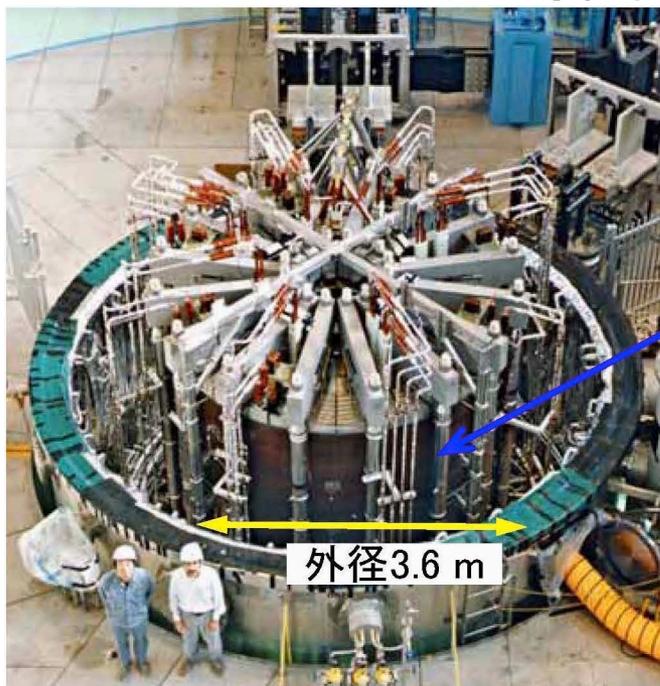
45x85x125x250x450 mm
(ベースライン撚りピッチ)

- ◆ 導体試験で、繰り返し励磁による *T_{cs}* 低下 (*I_c* 低下) が観測され、銅比, 撚りピッチ, ボイド率の変更, 素線 *I_c* の向上などの対策を実施。
 - ◆ 短い撚りピッチ (STP) の採用により, 繰り返し励磁による性能低下を克服。
- しかし, DEMO の条件でも有効かは未確認

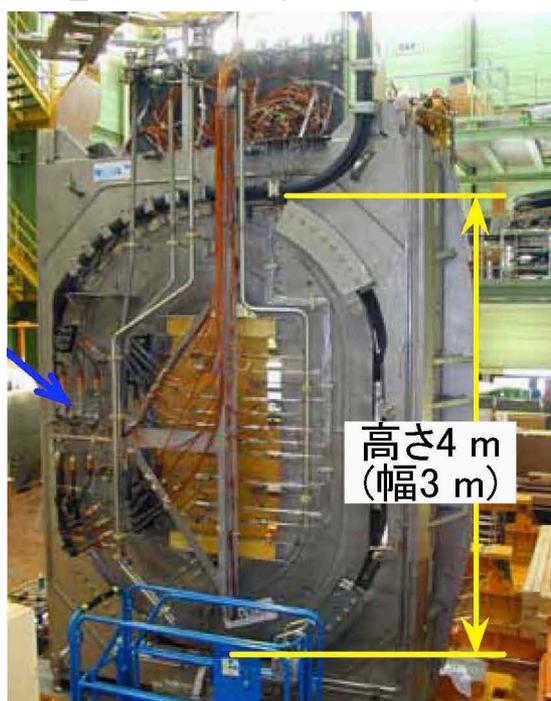


ITERマグネット開発の実績

1970-1985	LCT project (初めてNb ₃ Sn-CIC導体の採用)	
1993-1998	EDAのR&DとしてCSMC, TFMCの製作: 円形CIC導体を選定	} 10年
1995-1998	Incoloy908ジャケットの脆化対策	
1998-2002	CSMCとTFMCの実験: 冷却と励磁の繰り返しでI _c 低下を確認	
2006-2008	TFコイル導体開発(電磁力対策): 1,000回繰り返し励磁後I _c 測定	} 9年
2010-2014	CSコイル導体開発(電磁力対策): 短い撚りピッチに変更	



CS Model Coil (1993-2002)



TF Model Coil (1993-2002)

- 実機導体の製造は、2007年から9年間。Nb₃Sn素線は8社が競争して、性能向上と低コスト化に成功
- モデルコイルの製作と試験には大型予算と期間が必要であるが、技術開発と人材育成に大きく貢献