



ユニット名：超伝導・低温工学
Superconductivity & Cryogenics

核融合としての課題

高磁場大型超伝導マグネットを高い信頼性のもとで運転するための要素技術の確立

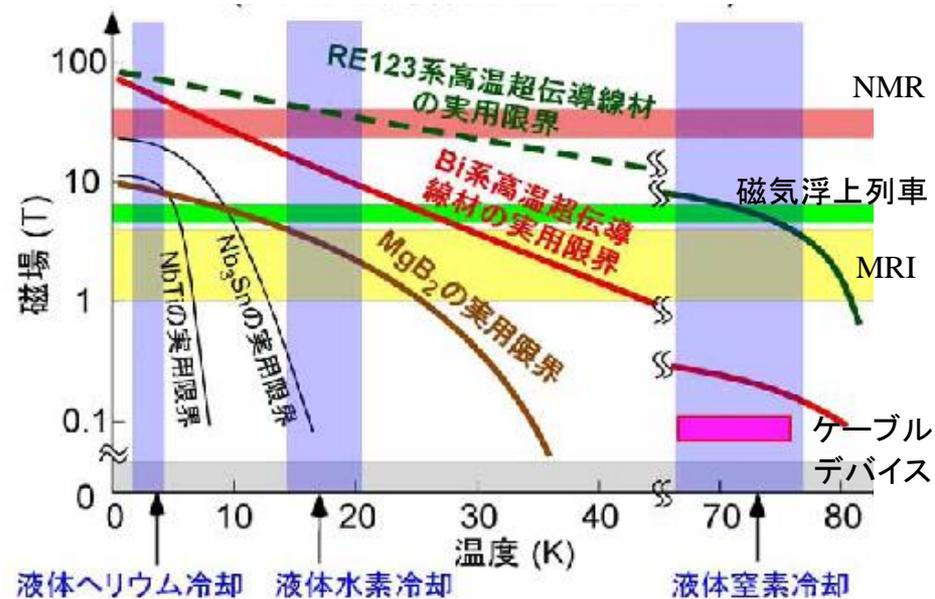
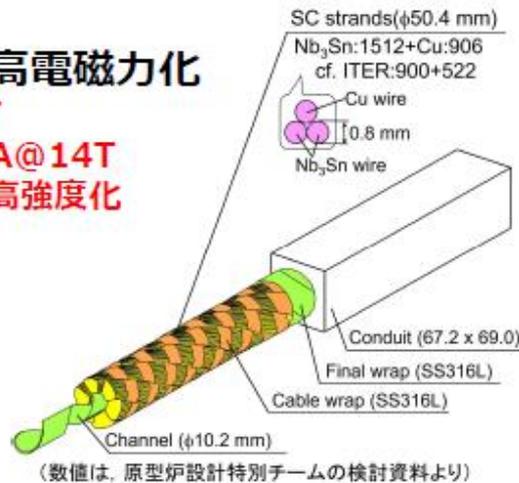
- ✓ 超伝導線を集合した導体、コイルの高い信頼性を得るための基本技術はまだ発展途上
- ✓ ITER以降の高磁場化要求を満たす新材料に期待
- ✓ 脆性材料であり、R & W製法に対応できる基礎研究が必要
- ✓ 大型コイルの冷却方法も検討要

大電流化・高電磁力化

68kA@11.8T

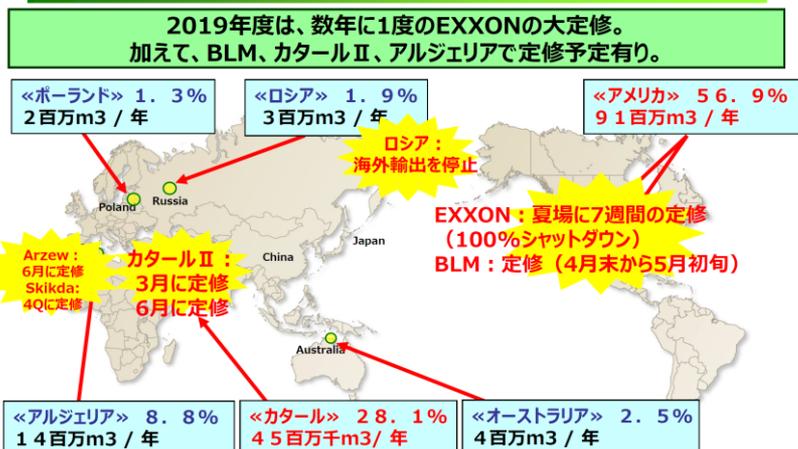
→ 83kA@14T

✓ 高 J_c 化及び高強度化



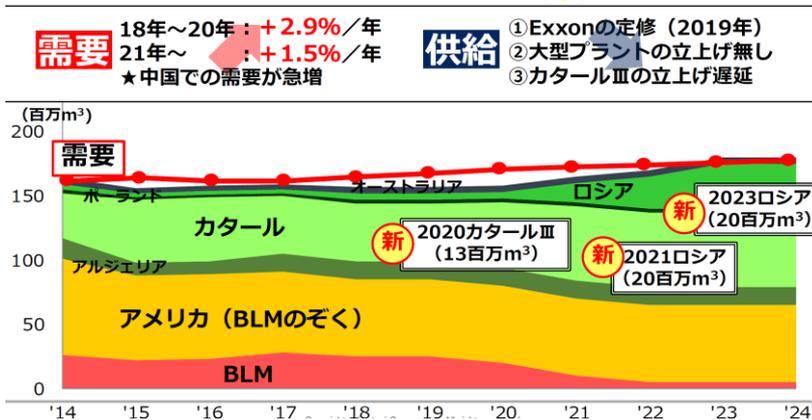
ヘリウムから水素へ —ヘリウム供給危機からの脱却—

2019年におけるヘリウム供給事情



世界需給 予測

2017年～2022年 需給環境がタイトになる懸念



資料提供：岩谷産業

時代背景

- 世界的なヘリウム供給不安定の懸念
- ヘリウムを生産できるガス田は6ヶ国しかない
- 従って、国際情勢の影響を受けやすい
- 最大の生産地は米国(シェア50%以上)
- 生産設備の故障や民間への供給制限により供給能力が低下
- 一方、中国を中心としてメモリーなどの半導体増産により需要が増加

将来展望

- 運転温度が高い超伝導コイル(高温超伝導コイル)を用い、液体水素も冷却に用いる選択肢に加えることで、この問題を解消

超伝導コイルを冷却する冷媒として
ヘリウムのみから水素も選択へ



学術的な特徴づけ

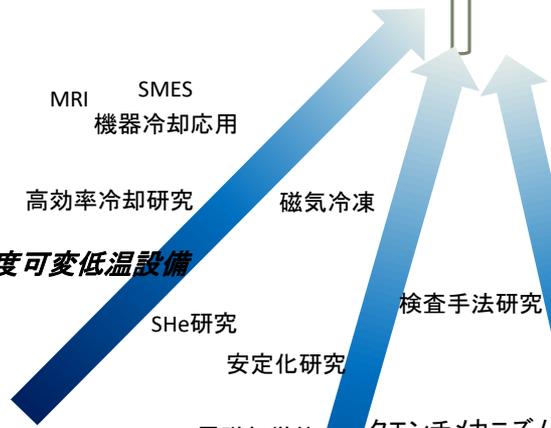


核融合発電の社会実装

ITER、原型炉への貢献



LHD研究



低温研究

MRI SMES
機器冷却応用

高効率冷却研究

磁気冷凍

温度可変低温設備

SHe研究

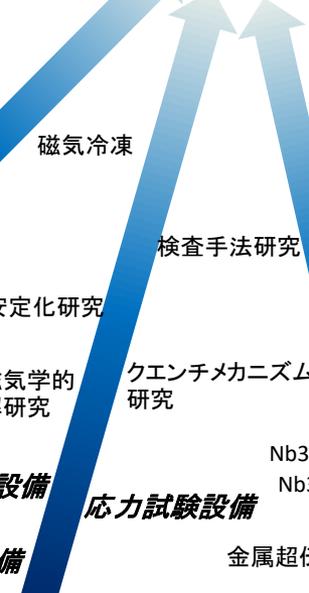
安定化研究

電磁気学的
理解研究

大口径試験設備

導体試験設備

超伝導研究



検査手法研究

クエンチメカニズム
研究

応力試験設備

Nb3Sn
Nb3Al

金属超伝導

材料研究

超極細線材研究

高温超伝導

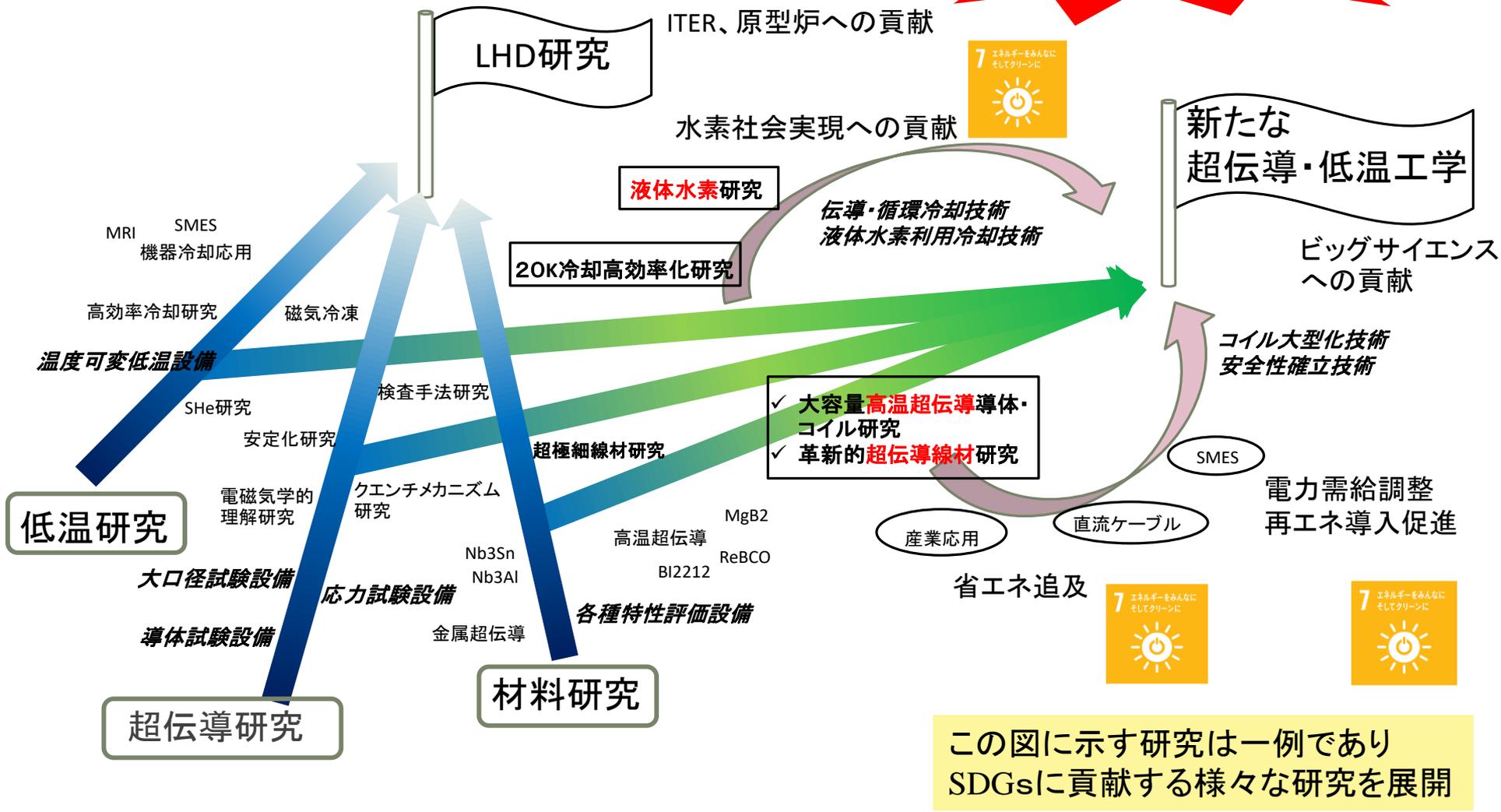
ReBCO

BI2212

各種特性評価設備

学術的な特徴づけ

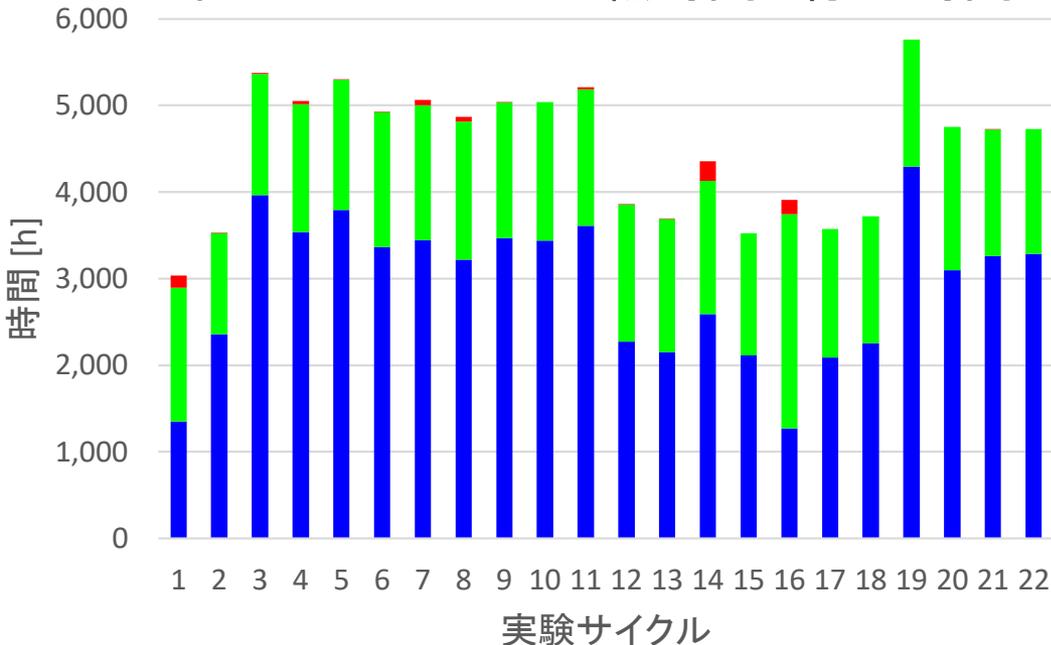
核融合発電の社会実装



この図に示す研究は一例であり
SDGsに貢献する様々な研究を展開

ヘリウム液化システムの長期高稼働率運転実績

LHD低温システムの運転時間と停止時間



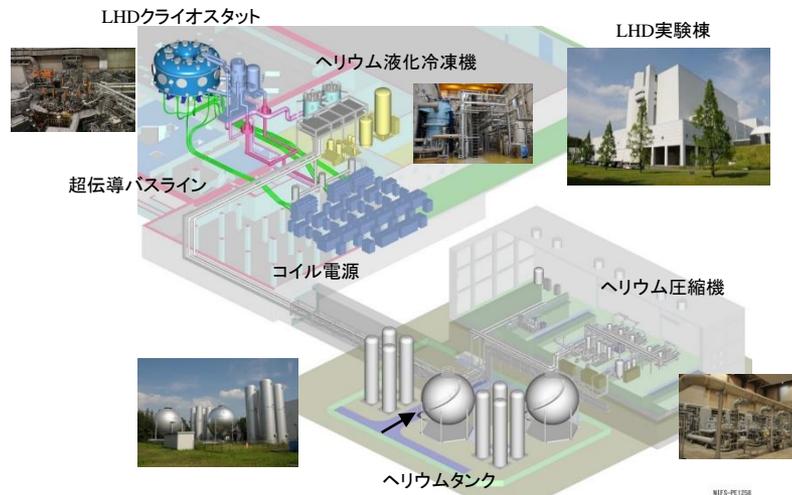
■ 定常運転 (h) ■ 精製/予冷/加温 (h) ■ 停止時間 (h)

運転時間: 98,267時間

定常冷却: 64,229時間

停止時間: 743.2時間

稼働率 (実運転時間/運転時間(計画)) = 99.2%



LHD超伝導低温システムの構成

長期連続運転で得られた様々なデータ、ノウハウを整理・解析

同様の大型システム(科学技術用、一般産業用)の構築に寄与
完全無人水素液化機の開発



アプローチ(定式化)

これまでNIFSが行ってきた超伝導工学・低温工学研究を整理し、持続可能社会変革に向けた新たな超伝導・低温工学研究に再構築。

持続可能社会における超伝導システムの出口戦略を明確にし、超伝導技術の社会実装に向けた研究開発を実施。

学術的研究拠点として、超伝導マグネット研究棟が現有する温度可変低温システムなどを用いた各種低温実験環境を、産学連携等の様々なユーザーへ提供。

持続可能社会を実現するための達成目標 (SDGs) のクリーンエネルギーとして位置付けられる「水素」を液体水素として運用する実績を積み、その安全性を含めた社会受容性を高め、水素社会の実現に貢献。



NIFSの代表的な超伝導評価設備

小型超伝導試験装置
(-200°C (液体窒素)、
磁場なし)

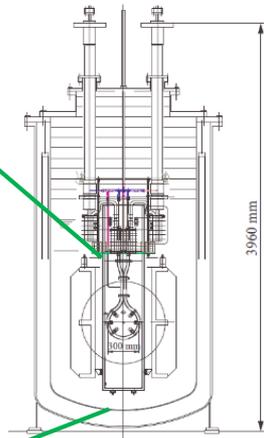
短尺超伝導
1 m 試験



短尺超伝導 (3 m)
試験

3 m

大型超伝導超伝導試験装置
(温度可変、磁場 9 テスラ)

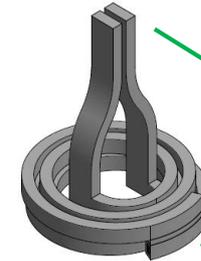


4 m

短尺超伝導 (2~3 m) 試験

短尺超伝導 (3~10 m) 試験

大口径高磁場超伝導試験装置
(温度可変、磁場 13 テスラ)

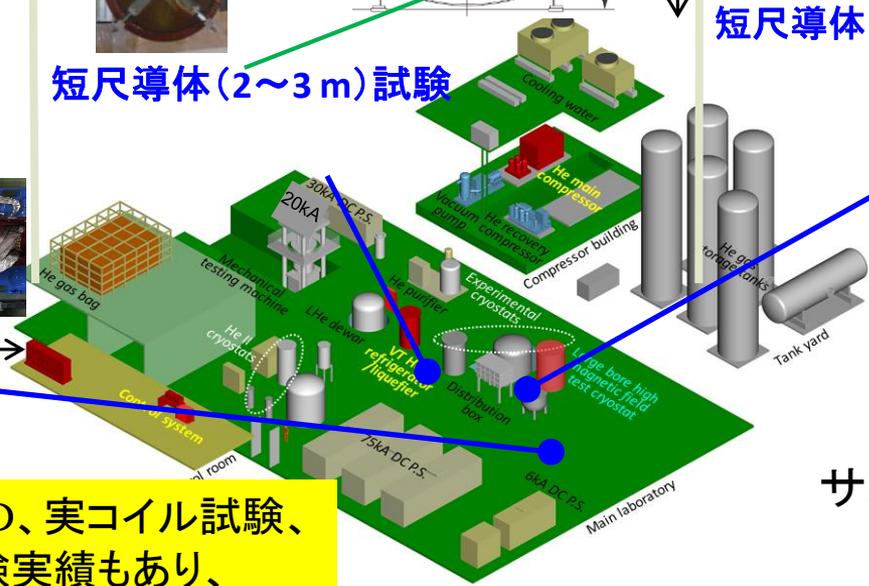


3.3 m



サンプル直流通電可能容量
6,20,75 kA

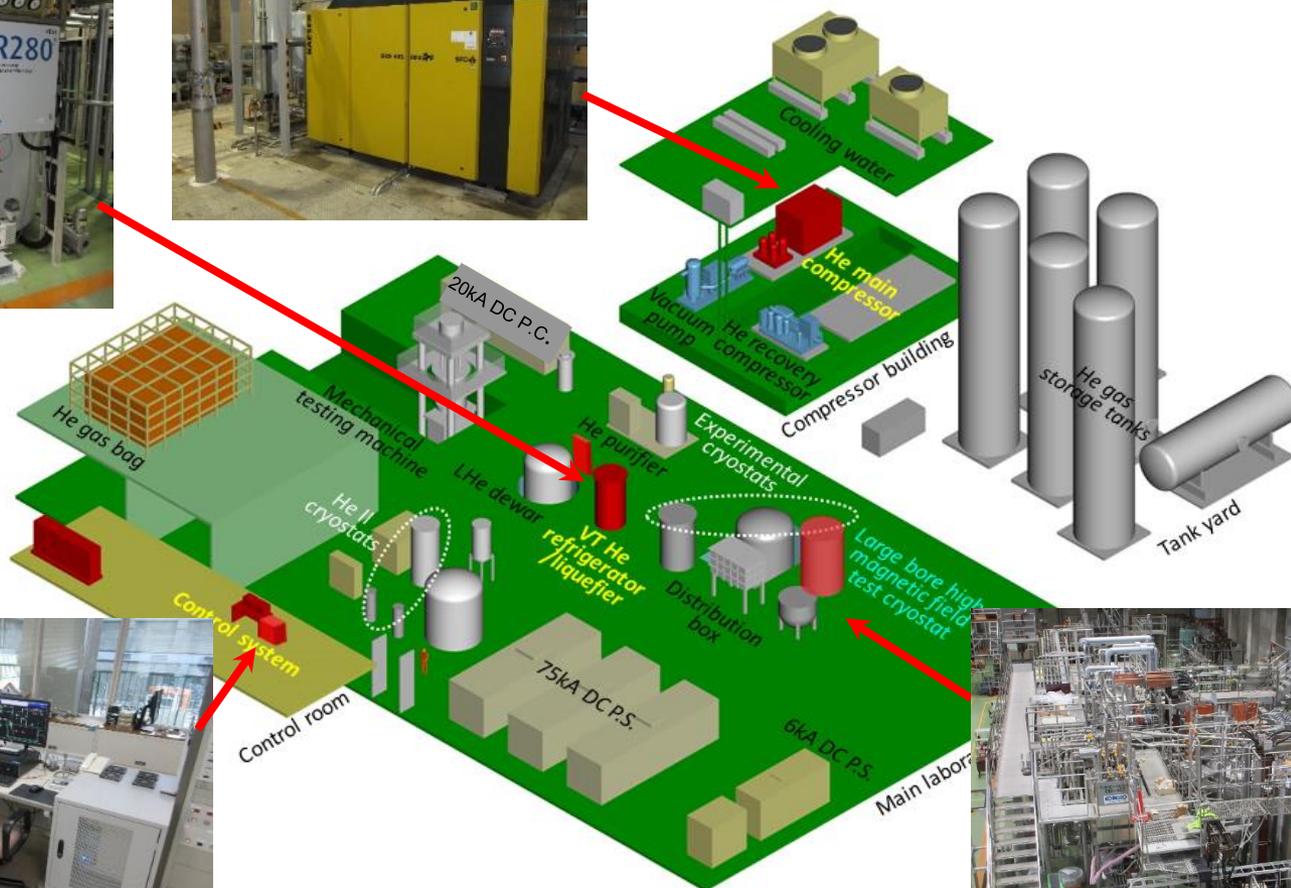
ITER や JT-60SA の R&D、実コイル試験、
実超伝導接続部の評価試験実績もあり、
ITER / BA プロジェクトに多大なる貢献





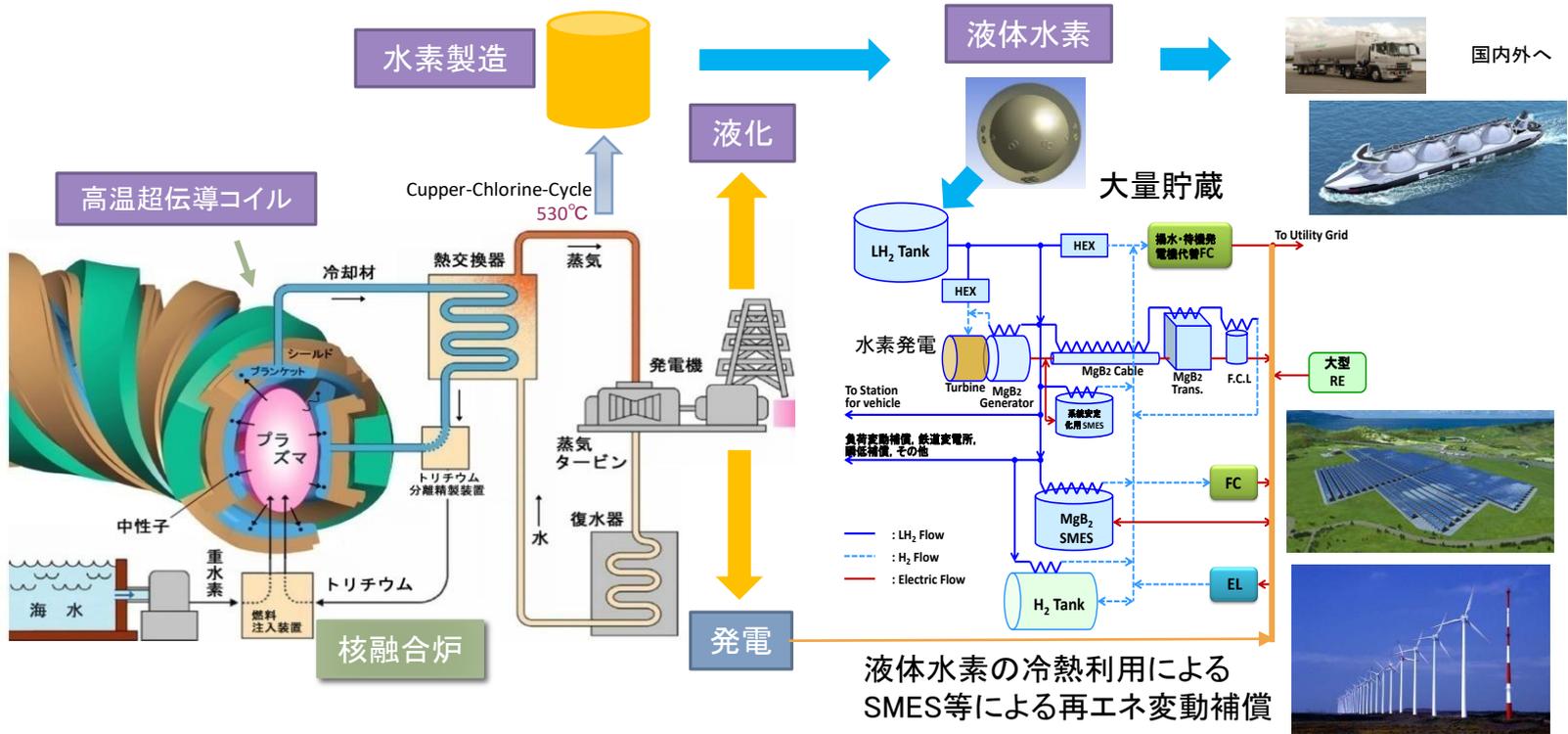
温度可変低温設備

冷凍能力600W at 4.5K
 ヘリウム液化能力250L/h
 超臨界圧ヘリウム供給流量50g/s 350W at 4.55K
 温度可変冷媒供給能力1.0kW at 20-30K
 1.5kW at 40-50K



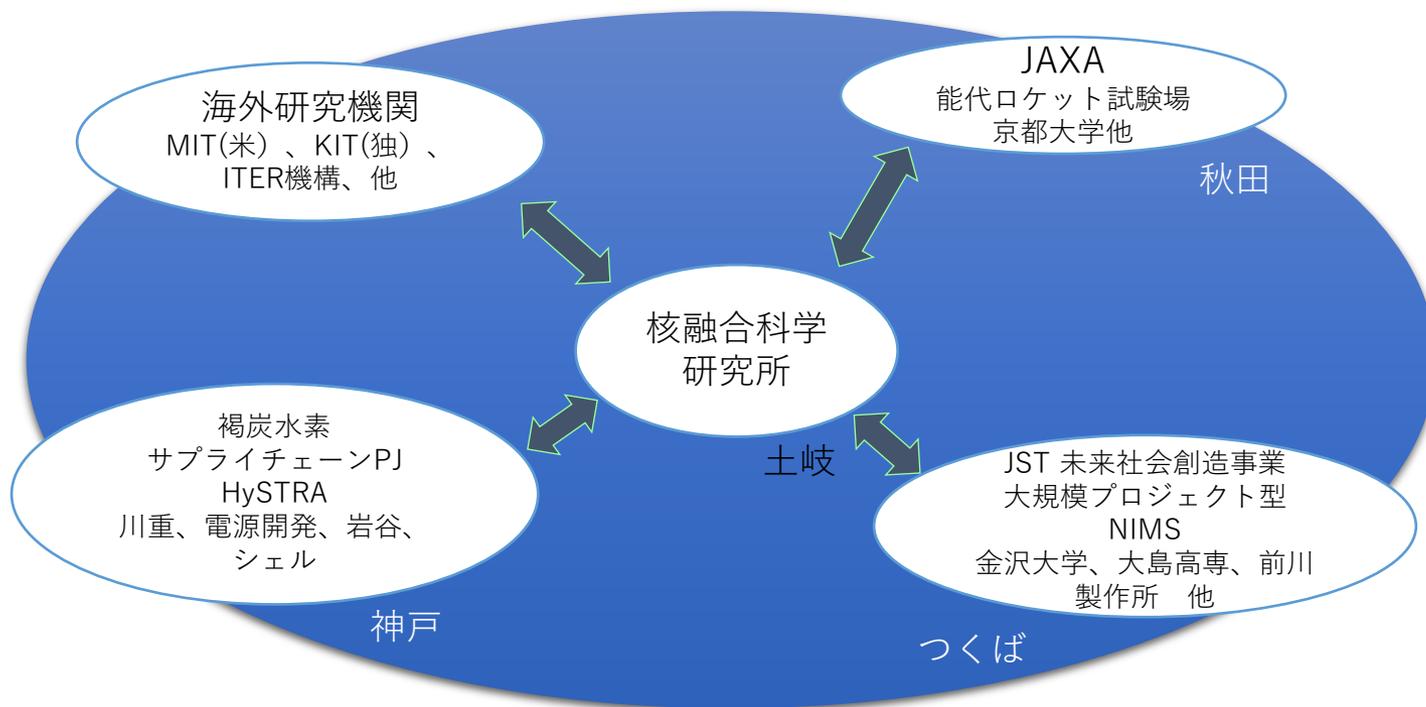
アプローチ(定式化)

「水素」は昨年10月に策定された第6次エネルギー基本計画にも、明確に研究開発すべきエネルギー源として明示
 液体水素は核融合（超伝導・低温工学）と親和性が高い



アプローチ(定式化)

液体水素研究開発のネットワークのハブ的な存在として、基礎研究から社会実装に向けた試みのゲートウェイ的な役割を担う。



アプローチ(定式化)

MgB₂を含めた高温超伝導マグネットの信頼性及び汎用性を高める研究開発を展開し、社会実装を図る。



加速器マグネット
への適用

- ・医療用
- ・核種消滅応用



MJ級瞬低補償
高温SMESへの
適用



核融合炉への
適用

再生可能エネルギーの
発電変動補償用100MJ級
SMESへの適用



Y系コイル



MgB₂コイル

産業用マグネット
への適用

- ・誘導加熱
- ・磁気分離

電動航空機用
超伝導推進モータへの
応用



出典: AIRBUS社



アプローチ(定式化)

超伝導マグネット研究棟の現有設備を維持、あるいはアップグレードの為の研究資金が必要。

「超伝導システムの出口戦略」、「液体水素」などをキーワードとした国プロに積極的に提案、獲得し推進。

競争的研究資金の一例

JST関係

- ・戦略的創造研究推進事業
- ・未来社会創造事業

NEDO関係

- ・水素利用等先導研究開発事業
- ・脱炭素社会実現に向けた省エネルギー技術の研究開発・社会実装促進プログラム



学際的展開

超伝導・低温工学は、ITERの実現や加速器、高分解能NMR等のビッグサイエンスを支える機器の発展に貢献。

高い安全性及び信頼性に基づく超伝導技術が拓く高磁界利用の世界は、様々な分野への応用が可能

素粒子・天文（宇宙）・医療・輸送・エネルギーなど

液体ヘリウムに加えて液体水素等の寒剤の選択枝が広がることで、思いもつかないような学際領域と連携

- ・ 高温SMESによるSDGsへの貢献
- ・ 極低温冷却量子コンピュータ等の量子技術の開拓に寄与

核融合の早期社会実装につながるだけでなく、量子技術进行研究する大学共同利用機関の拠点として発展する可能性

独自性, 優位性など

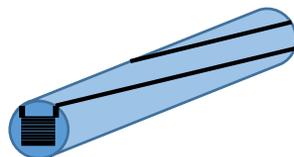
1) 核融合コミュニティにおける超伝導工学の拠点形成

核融合炉用高温超伝導導体・コイル評価機関としての優位性
大容量高温超伝導導体の試作と温度可変での特性評価実績

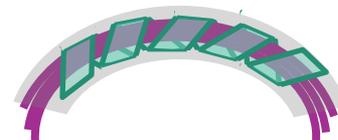
① 単純積層型
STARS 導体



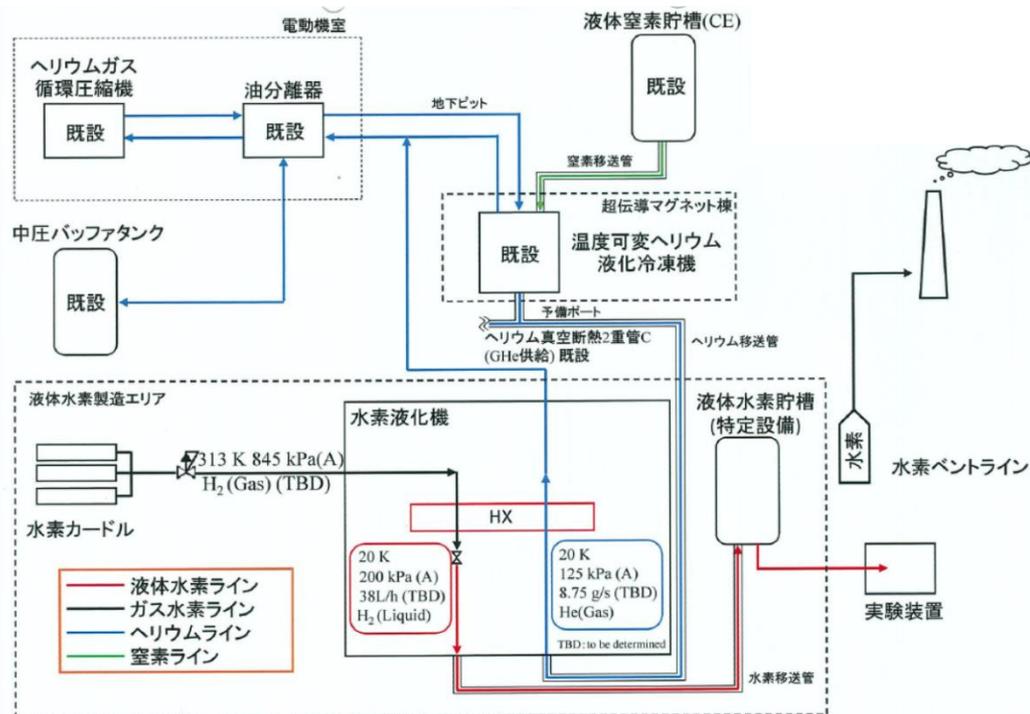
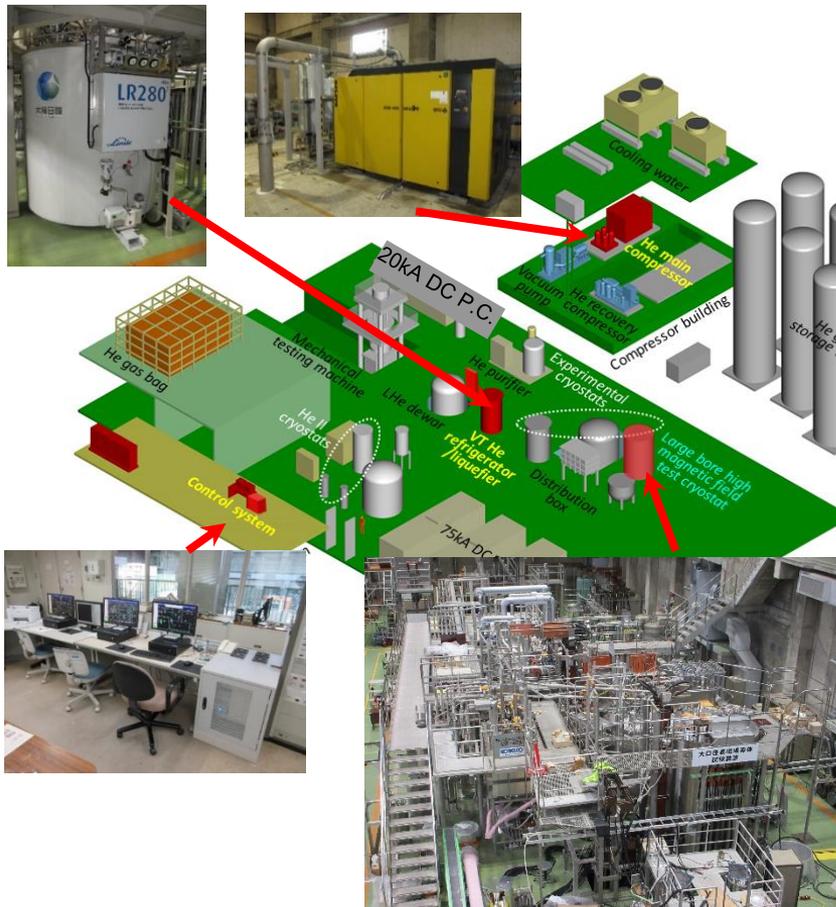
② 積層撚線型 FAIR 導体



③ 低融点金属含浸型
WISE 導体



温度可変低温設備(超伝導マグネット研究棟)



水素液化改造系統図

既設設備改造で約40L/hの水素液化が可能

液体ヘリウム環境、液体水素環境両者を同時に持つ多彩な低温環境を実現できる独自性の高い研究拠点となり得る。

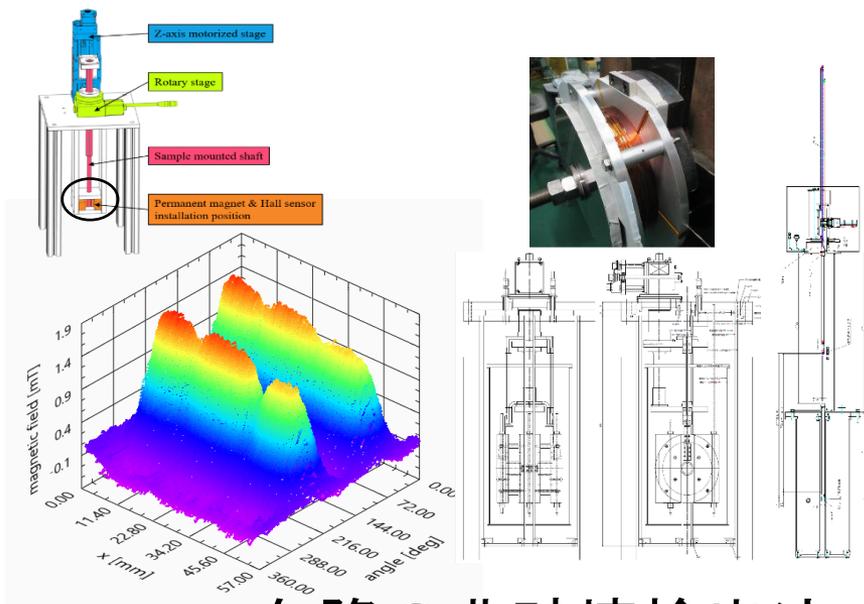
独自性, 優位性など

2) 超伝導・低温分野における立ち位置

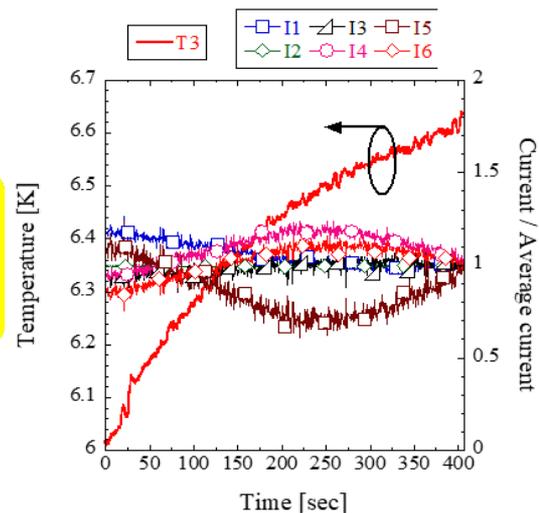
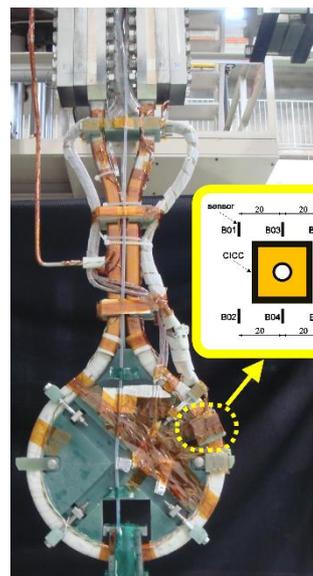
＜超伝導マグネット研究＞

超伝導素線の劣化検出や超伝導機器の故障時の焼損回避などは世界中で解決すべき重要事項。

NIFS独自の非破壊検査手法や電流分布計測等の超高感度検出技術を用いた超伝導素線や超伝導機器の異常検出。



欠陥の非破壊検出法



導体の電流分布計測



独自性, 優位性など

2) 超伝導・低温分野における立ち位置

<低温研究>

低温研究実績を礎に、超伝導素線から大電流導体までの冷却安定性、多孔質や狭路—拡大路における熱流動、沸騰—疑似沸騰現象等の低温物理の基礎研究の基盤が整備。

液体水素の安全性や社会受容性の課題に対し、液体ヘリウムで培った実績を基に基礎物性等の研究を展開。

液体水素の冷熱利用や超伝導機器冷却標準化の先駆け。

核融合の新規出力形態を検討するユニットとも緊密に連携。

IEC/TC90超電導委員会の技術委員会国内WG12において、超伝導機器の冷却システムの国際標準化に向けた活動を行っている。

国内WG12委員: 三戸利行(委員長、核融合研)、前畑京介(九州大学)、山田豊(東海大)、
新富孝和(高エネ研) 淵野修一郎(産総研)、平野直樹(核融合研)、筑本知子(中部大)、
池内正充(前川製作所)、平井寛一(大陽日酸)、李瑞(住友重機械)、渡部充彦(住友電工)

オブザーバー: 奥山 昂(アルバッククライオ)

事務局: 中井昭暢(電線工業会)

IEC/TC90 国内組織 (2022~)

IEC/TC90超電導委員会

事務局：
日本電線工業会 (国内審議団体)

運営委員会

技術委員会*

JIS原案作成委員会***

JISWG13***

企画委員会*

- WG1* 超電導関連用語
- WG2* Nb-Ti線 I_c 試験方法
- WG3* 酸化物超電導線 I_c 試験方法
- WG4* 超電導線RRR試験方法
- WG5* 超電導線機械的特性試験方法
- WG6*** **超電導線銅比試験方法**
- WG7*** **Nb₃Sn線 I_c 試験方法**
- WG8* 電気的特性測定方法
- WG9* 交流損失試験方法
- WG10* バルク体補足磁束密度試験方法
- WG11* 臨界温度試験方法
- WG12*** **電流リード、冷却システム方法**
- WG13*** **実用超電導線**
- WG14* 超電導センサ

超電導ケーブル技術査委員会**

赤字はNIFSが委員長
下線はNIFSが委員参加

委員：約100人
大学：約40人
研究機関：約30人
企業：約30人

オブザーバ
経産省
日本規格協会

委員長
WG6: 菱沼良光
WG12: 三戸利行

*：JKAからの補助事業：「超電導国際標準化の推進に関する補助事業」

**：MRI委託事業：「戦略的国際標準化加速事業（政府戦略分野に係る国際標準開発活動）
（超電導ケーブルの臨界電流測定方法に関する国際標準化）」

***：日本規格協会：「平成31年度JIS原案作成公募制度
（「JIS H 73XX 超電導—実用超電導線材の試験方法の通則」の制定）」



独自性, 優位性など

2) 超伝導・低温分野における立ち位置

<超伝導材料研究>

- 超伝導材料のイノベーションは核融合だけでなく、種々のビッグサイエンスの世界を変革する可能性
- そもそも、超伝導材料は省エネ・省電力等のSDG's社会実装目標に対して親和性が高い。

超伝導の社会実装が中々進んでいない状況……。

要因: 高温超伝導(Y系)はテープ形状で交流損失が大きい

Nb₃Snや高温超伝導(Bi系)は化合物であり、機械強度が低い。

高コスト

低い信頼性・汎用性に乏しい。

⇒ 応用範囲・製法が限定的

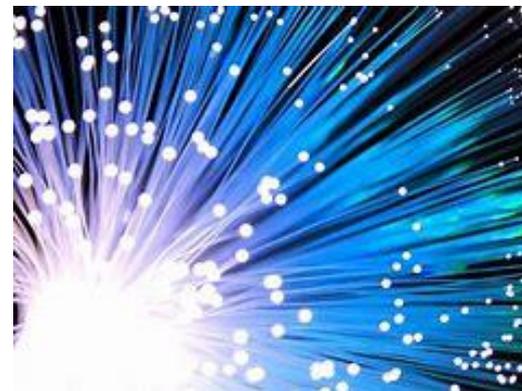
SDG'sやビッグサイエンスへの幅広い適用を目指して、「**取扱易い超伝導材料**」による信頼性・汎用性を高める研究開発を展開。

独自性, 優位性など

材料の21世紀へのストラテジー-金属系材料の視点から見た提言
 平成12年「物質創製工学研究連絡委員会金属材料専門委員会報告」
 日本学術会議 物質創製工学研究連絡委員会 金属材料専門委員会
<https://www.scj.go.jp/ja///info/kohyo/17htm/1770z.html>

- ✓ 歴史的に学術(材料工学)の進展に伴って、研究指向が”重厚長大”から”軽薄短小”、そして”**極超省信**”に変遷している。
 極: 極真空, 極純度, **極微粒子**, **超加工** (極限に限りなく近づける技術)
 超: 超高温, 超高速, **超強度**, **超弾性**, **超塑性** (現在の性能を大幅に越えたもの)
 省: **省資源**, 省エネルギー (簡素化, **小型化**, 代替化, 自然化, リサイクル技術を含む)
 信: **信頼性**, **安全性** (物理的信頼性と共に, 安全, 健康, 平和を含む)
- ✓ 超極細線加工技術は、“**超極省信**”と合致しており、金属工学の発展に寄与する。

光ファイバーで実現したように、硬くて脆い化合物系・Bi系高温超伝導線材の**超極細線加工**を検討することで、これまでよりも格段に“**扱い易い(高い安全性・信頼性)**”超伝導線材が実現??



超伝導線材の
超極細線加工



- 金属加工学
- 金属組織学
- 粉体工学



React&Windingの可能性



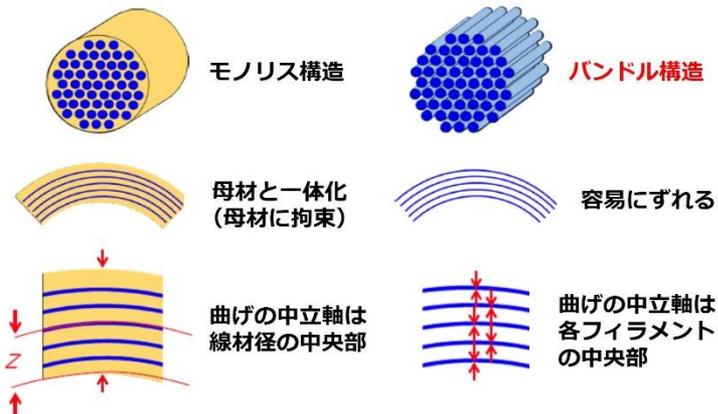
低コスト化・多彩なコイル巻線

独自性, 優位性など

Nb₃Sn、Nb₃Alあるいは酸化物高温超伝導線材の超極細加工が可能となれば……

これまでの極細多芯線

超極細線 (新概念)



- ✓ 可撓性を利用した超高次撚線(編組線)への期待。
(交流応用、量子応用、宇宙応用へ)
 - ✓ **React & Winding**製法への期待。
 - ✓ 均一な電流分布(偏流抑制)への期待。
 - ✓ 簡易的な間接冷却方式の採用が可能。
- 革新的な導体設計への期待



Nb₃SnやNb₃Al線での超極細加工の経験や知見を基に、**MgB₂**や**BSCCO**等に適用しているPowder-In-Tube (PIT)法における超極細線加工研究へ展開を検討している。



「低温」ユニット提案としてのまとめ

- ✓ 核融合としての課題
 - 高磁場大型超伝導マグネットの高信頼要素技術確立
- ✓ 学術的な特徴づけ
 - 研究実績に「水素」も取り込み高信頼性指向の工学研究
 - 次世代の核融合工学にフィードバック
- ✓ アプローチ
 - これまでの超伝導・低温工学研究を、持続可能社会変革に向けた新たな研究に再構築
 - 液体水素研究のゲートウェイ的な役割
- ✓ 学際的展開
 - 高磁界や低温利用は様々な分野に応用可
- ✓ 独自性、優位性など
 - 多彩な低温環境試験設備等を保有する強み
 - 豊富な試験評価実績と、革新的な線材研究