



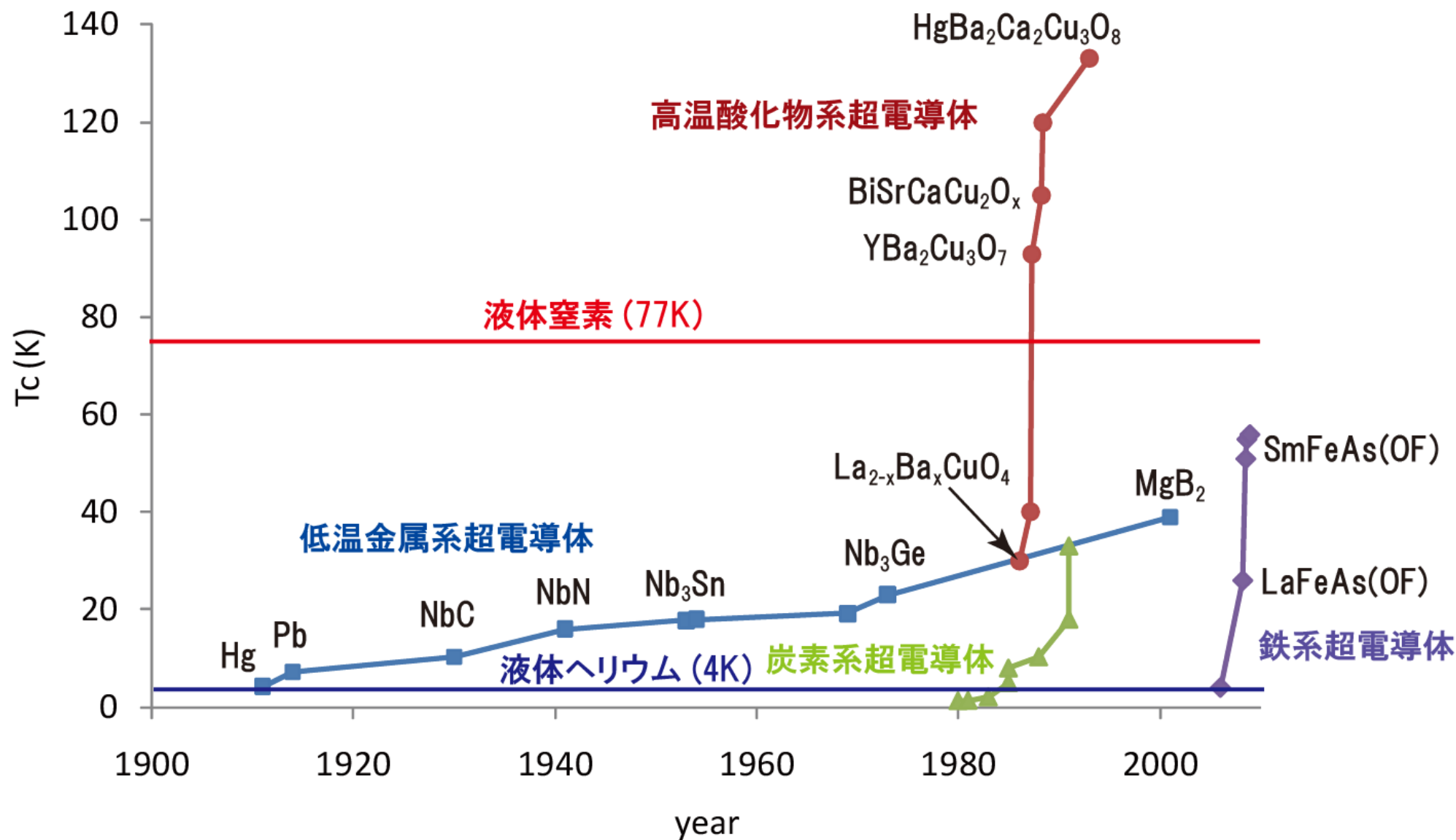
高温超伝導コイル開発の現状と スケルトン・サイクロトロンへの応用

早稲田大学理工学術院 石山敦士

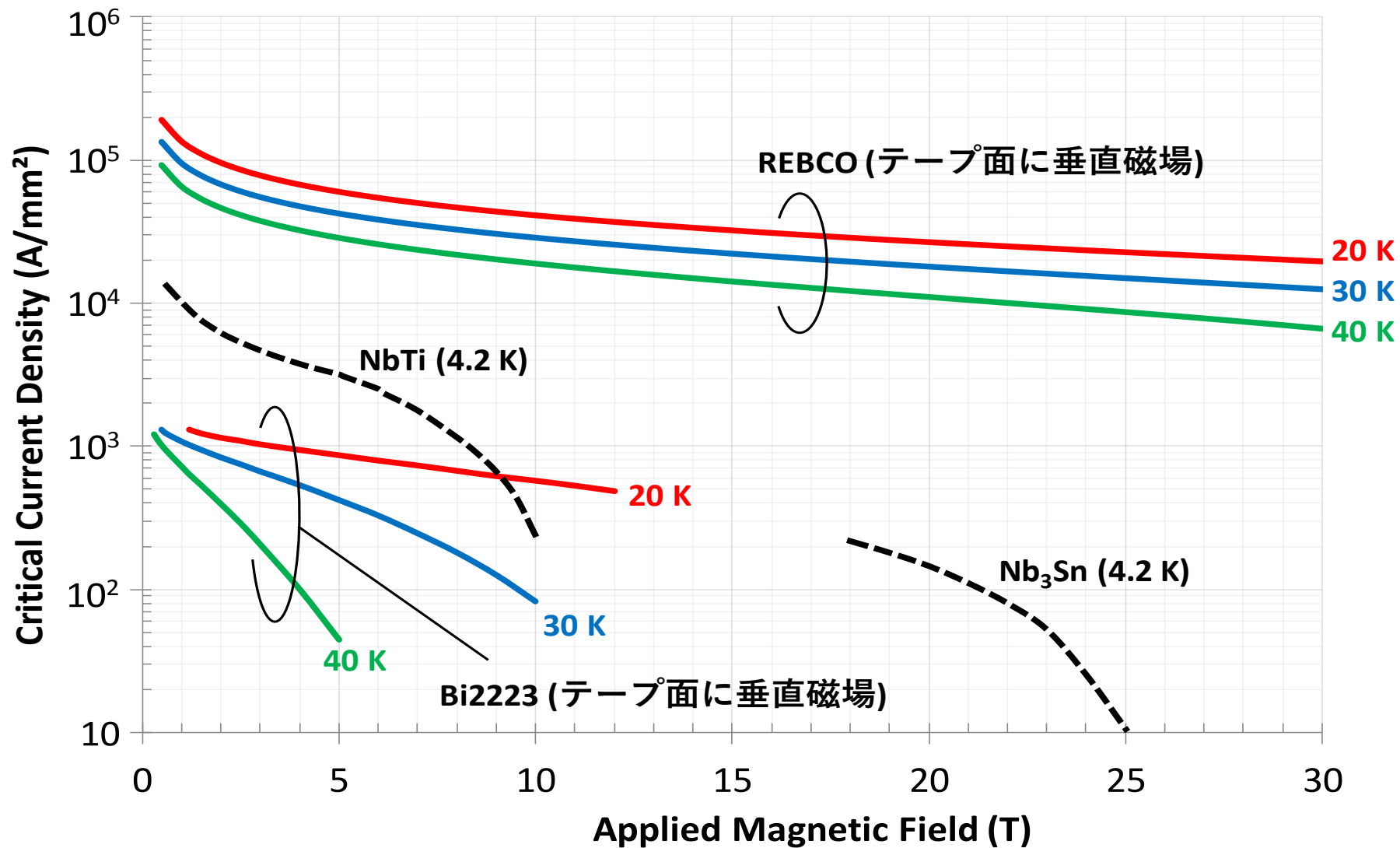
2019.3.9



超伝導体発見の歴史

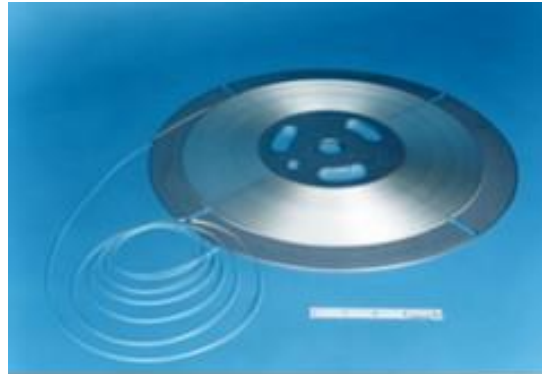
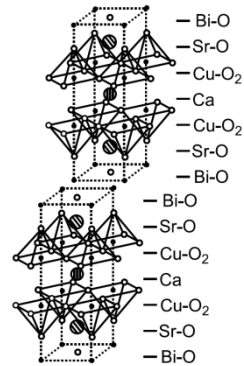


高温超伝導線材の優れた特性

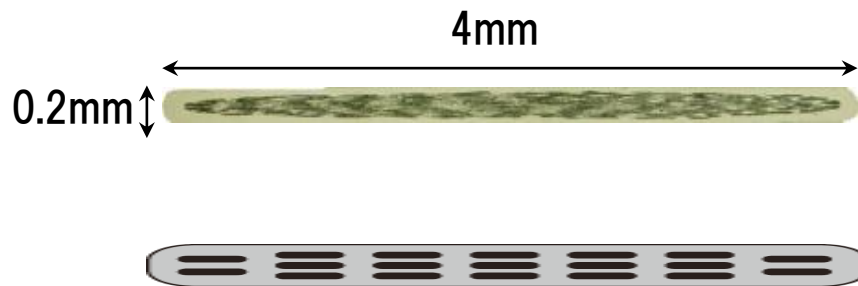


高温酸化物系超電導線材

Bi2223

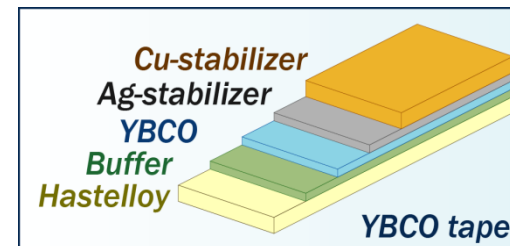
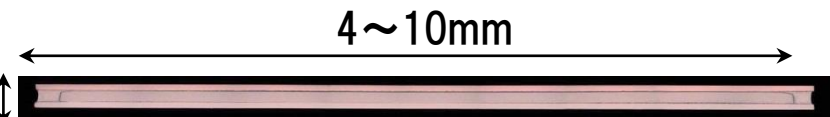
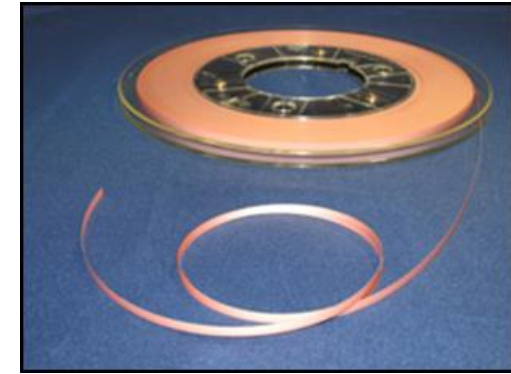
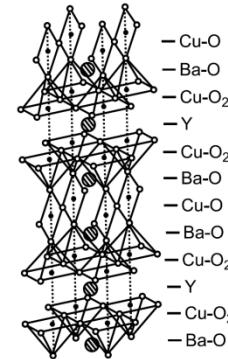


▲ ビスマス系高温超電導線「DI-BSCCO」(住友電工)



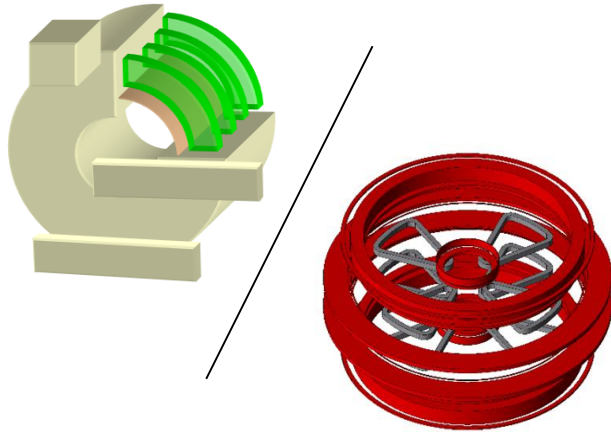
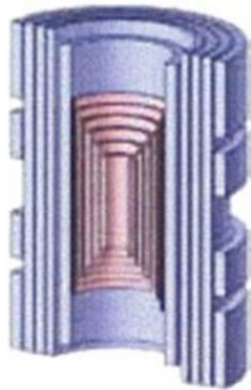
多芯線

REBCO

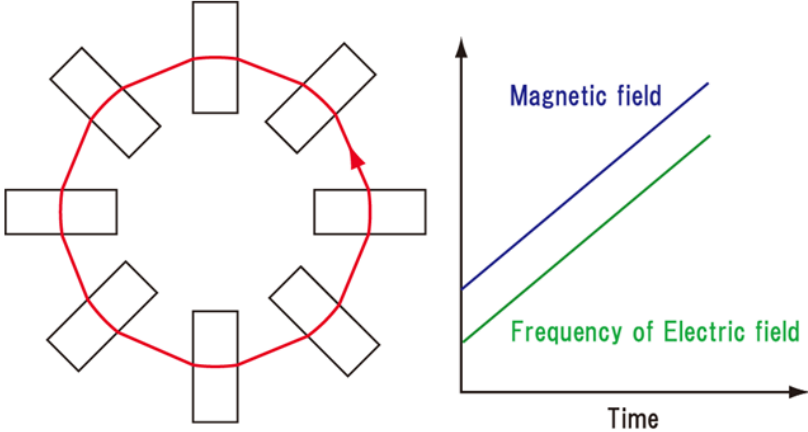
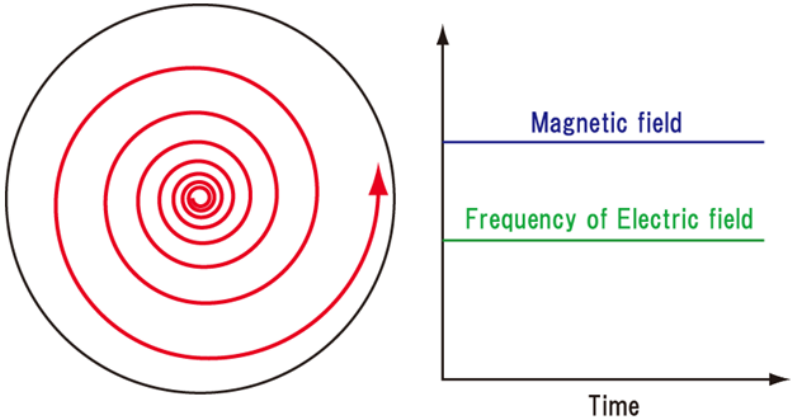


薄膜線(コート線)

応用目的と想定されるコイル仕様

	MRI/サイクロトロン	NMR
発生磁場	～10T	>30T(1.3GHz)
電流密度	数百A/mm ²	数百A/mm ²
口径	数十cm～1m	数cm
運転温度	>20K	4.2K
電磁力(フープ応力)	BJR>数GPa	BJR>数百MPa
巻線方式	パンケーキ	パンケーキ or レイヤー
コイルシステム		

シンクロトロンとサイクロトロンの比較

シンクロトロン	サイクロトロン
	
・制御が複雑 粒子の速度と同期して磁場を変化 ・多数の電磁石を同期＋パルス運転 ・ビームが断続的となる ・大型スペースが必要 ・構成磁石間のスペースがあるので、ビーム補正が容易 ・エネルギー可変 ・ビーム取り出し効率が高く、装置の放射化が比較的少ない	・制御が容易 磁場は一定 ・数個の電磁石をDC運転 ・ビームを連続的に取り出せる ・小型化が可能 高温超伝導空心コイルの適用へ ・高い磁場精度が必要 (銅コイル・鉄心の温度管理がシビア) ・エネルギー固定 ・ビーム取り出し効率は70～90%程度で、失われたビームによる装置(ビーム取り出し分)の放射化に注意を要する

サイクロトロンに必要な磁場

等時性

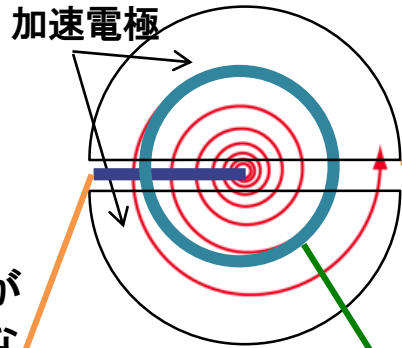
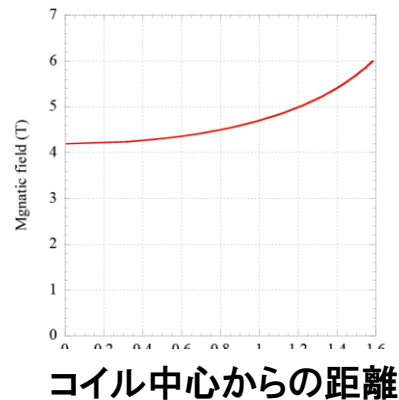
粒子が一周する間にかかる時間が同じになる

粒子は加速されるたびに、軌道半径が大きくなり(らせん運動)、質量が重くなる(相対論効果)。

等時性磁場

径方向に増加する磁場で、等時性を維持する

主コイル(円形スプリットコイル)



ビーム軌道安定性

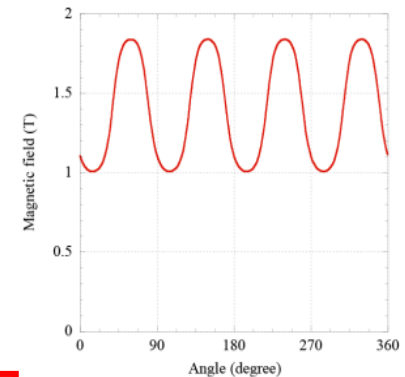
軌道からはずれた粒子の発散を抑える

mid-planeからはずれた粒子は発散する。

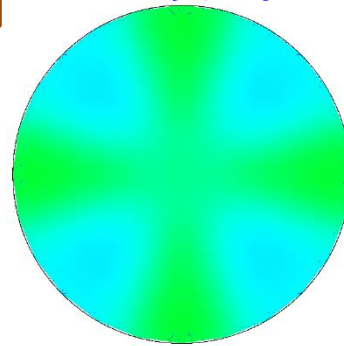
AVF (Azimuthally Varying Field)

周方向(粒子の進行方向)に周期的に強弱をつけた磁場で、粒子を集束させる(磁気レンズと同じ)

非円形セクターコイル



ビーム加速面の
磁場分布



高精度の磁場分布($10^{-3} \sim 10^{-4}$)必要

「次世代医療用高温超伝導スケルトンサイクロトロン の設計原理・開発基盤の確立」

α 線放出RI(^{211}At)の多量・安定・分散生産のための世界初の超小型・高強度・出力可変の加速器「高温超伝導スケルトン・サイクロトロン(「HTS-SC」と略記)」を開発することである。申請者らはこれまで、科研費等を受け、その根幹となる「**5-High: 高機械強度・高電流密度・高熱的安定・高磁場・高精度磁場**」を可能とする超伝導応用基盤技術の開発を進めてきた。本課題では、ビーム加速に不可欠な磁場分布を高精度に形成するための高温超伝導マルチコイルシステムを実現するために、**5-High技術を統合した革新的コイル化技術を開発し、それに基づくHTS-SCの設計原理・開発基盤の確立を目指す**。そして小型モデル(“Baby HTS-SCコイルシステム”)の設計・試作・実験により、HTS-SCの成立性・有効性を実証する

研究代表者 石山敦士(早稲田大学・理工学術院)

研究分担者 福田光宏(大阪大学・核物理研究センター)

鷲尾方一(早稲田大学・理工学術院)

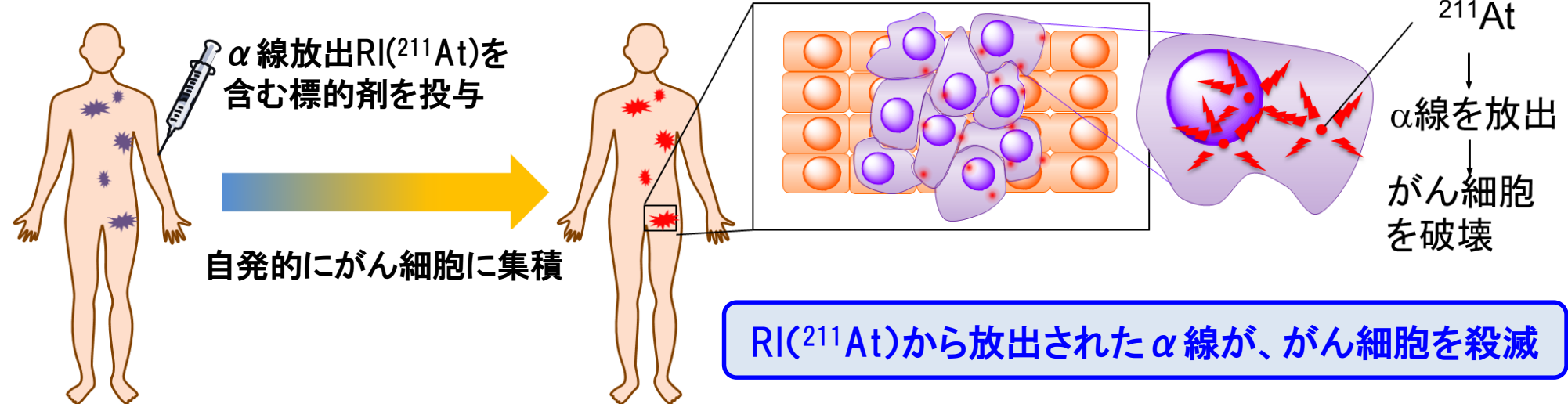
東 達也(QST・放射線医学総合研究所)

野口 聡(北海道大学・情報科学研究科)

植田浩史(岡山大学・自然科学研究科)

本研究のターゲット: α 線核医学治療普及のための課題

進行がん患者



メリット

- ・ 短い飛程: 周辺臓器への影響少い
- ・ 短寿命核種: 患者への負担少ない

デメリット

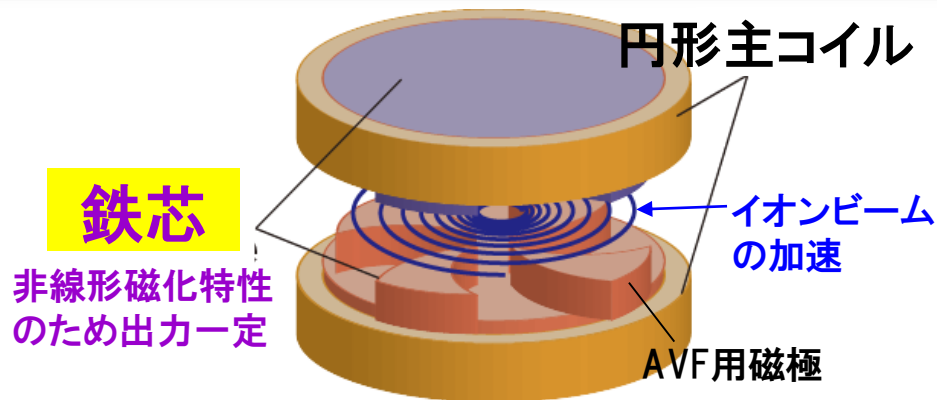
- ・ RI生産施設(加速器)が必要
- ・ 短寿命核種: 近くでの生産が必要

飛程: 約 $55\ \mu\text{m}$ 半減期: 7.2時間

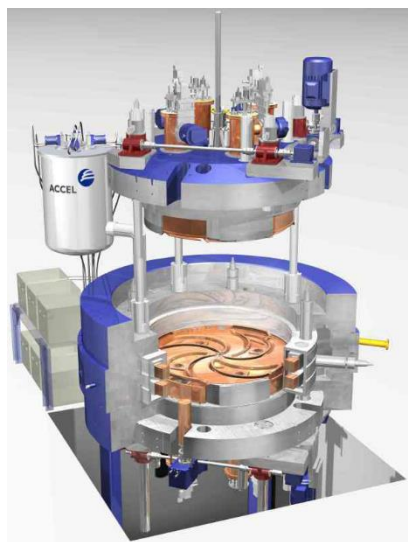
α 線RIを安定的に製造できる
超小型・高強度の加速器が必要

高温超伝導
スケルトン・サイクロトロン

世界初の高温超伝導加速器「スケルトン・サイクロトロン」



従来のAVFサイクロトロン



NbTi超伝導コイル使用
陽子線がん治療用(250MeV, nA)
PSI(スイス), RPTC(ドイツ)

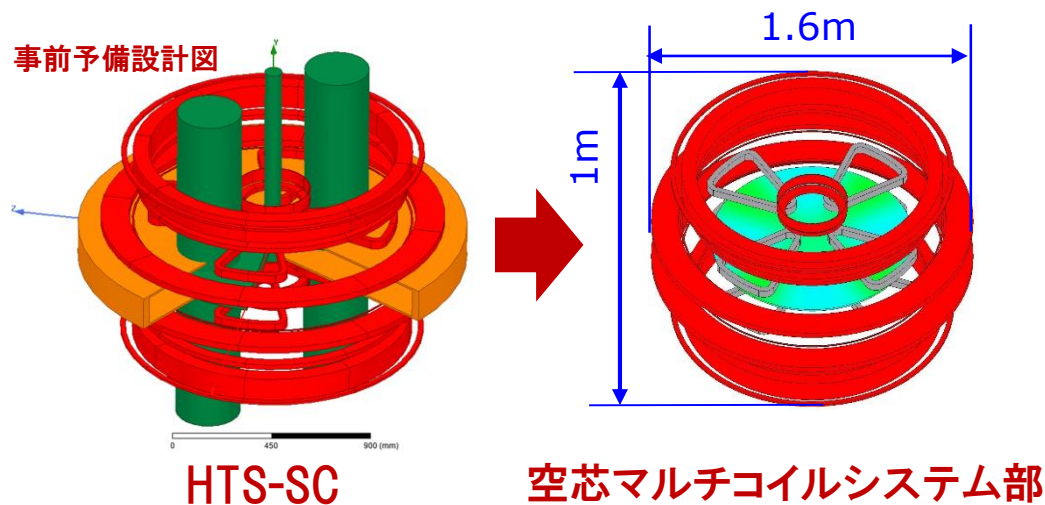


銅鉄コイル使用
PET用薬剤製造
20MeV, $\sim 100 \mu A$
住重HM-20

^{211}At の生成: 加速器で加速した ^4He イオンビームを ^{209}Bi ターゲットに照射して生じる $^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$ 反応によって生成。

HTS-SC(高温超伝導-スケルトン・サイクロトロン)

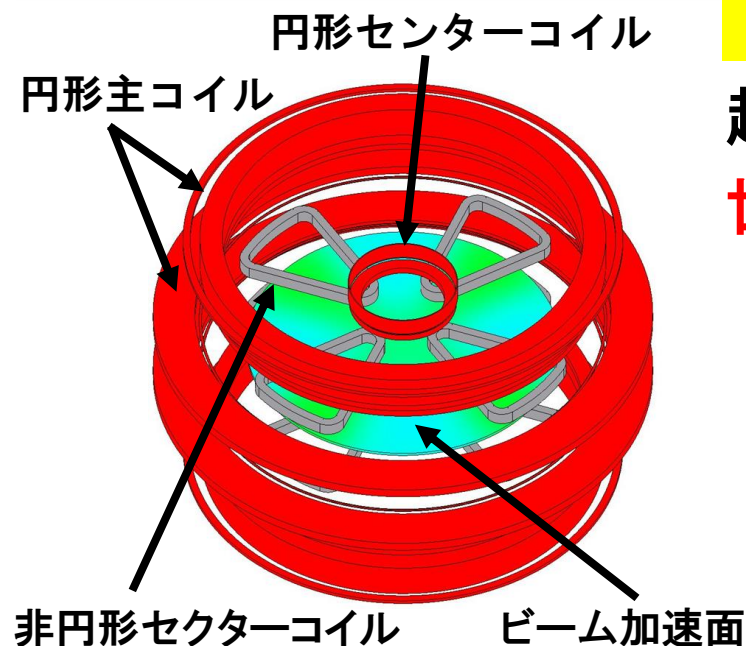
複数の **空芯** 高温超伝導コイルから成るマルチコイルシステムのみでイオンビーム(^4He イオンビーム)の加速に必要な高磁場・高精度磁場を形成



^{211}At **多量**製造 (36MeV, $500 \mu A$)

超小型軽量・大強度を実現!

エネルギー可変(多機能)「スケルトン・サイクロトロン」



空芯コイルの適用によって、、、
超小型軽量・大強度に加えて
世界初のエネルギー可変サイクロトロンの可能性

1) ^{211}At 製造(α 線内用療法)

エネルギー: 36MeV, 加速面平均磁場: 1.732T

2) PET用RI製造(大強度化が必要)

エネルギー: 18MeV, 加速面平均磁場: 1.232T

3) BNCT(中性子捕捉療法。切除困難ながんに有効)用中性子照射

エネルギー: 40MeV, 加速面平均磁場: 2.589T

4) ^{225}Ac (16MeV)等、他の α 線RI製造

などの機能を同一のHTS-SC(同一引出半径: 500mm)で行えるように磁場制御を可能とするシステムの実現を開発目標に！

世界初の超小型・高強度・出力可変の加速器「高温超伝導スケルトン・サイクロトロン」

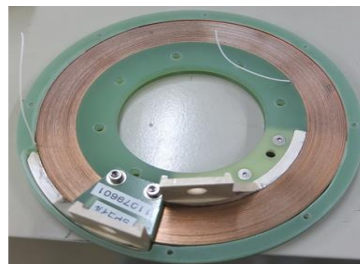
特許「空芯型サイクロトロン」 石山敦土、植田浩史、福田光宏、畑中吉治、鹿島直二、長屋重夫、「特願2010-132256 (2010年6月9日出願)、特開2011-258427、特許第5682903号(登録2015-01-23)」

基盤研究S等

H 高磁場化・小型化

設計最適化技術

Super-YOROI コイル構造＋無絶縁コイル技術



H 高磁場精度化

不整磁場(遮蔽電流磁場)の解析・低減技術

5-**H**igh
基盤技術

H 高機械強度化

Super-YOROI コイル構造

＜課題解決の特徴＞
高度で精緻な数値解析と
検証実験の
両面からのアプローチ

H 高熱的安定化

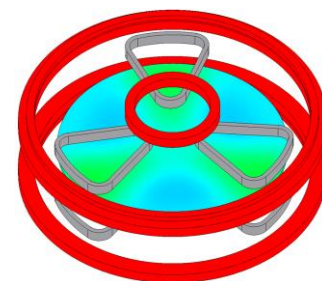
二律背反

H 高電流密度化

無絶縁(NI)コイル技術

5-High統合・革新的コイル化技術の開発

＜事前予備設計図＞

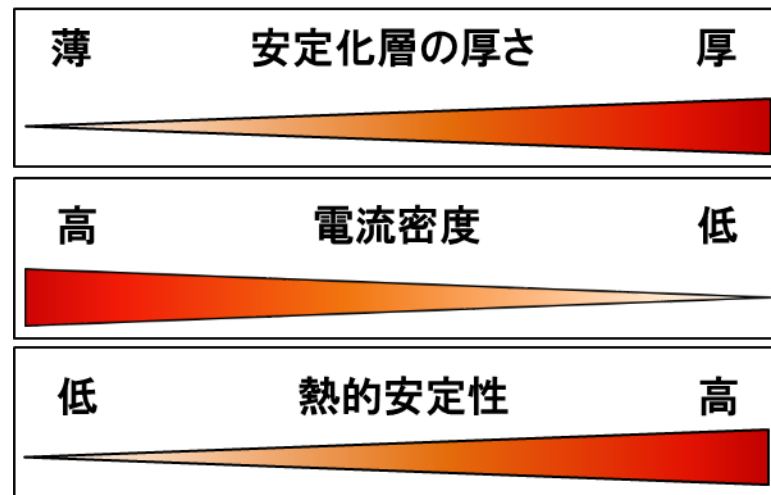


出力可変 Baby HTS-SC用
マルチコイルシステムの
試作・実証実験(基盤研究S)

HTS-SC用REBCOマルチコイルシステムの設計原理・開発基盤の確立

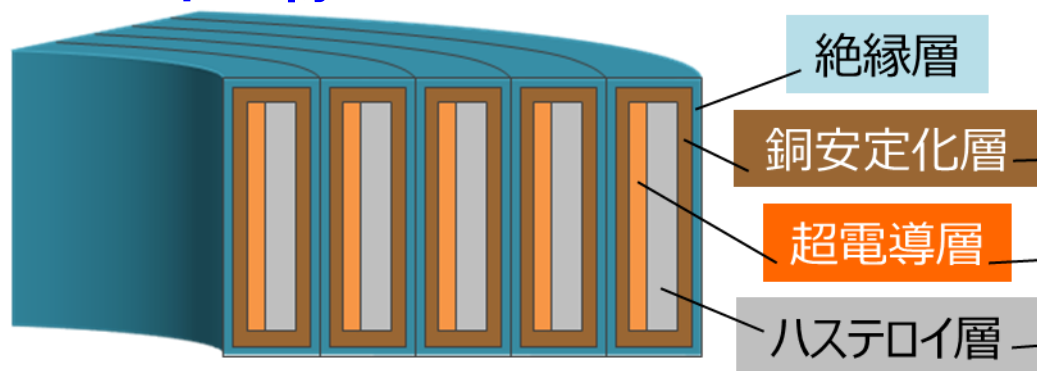
高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術(無絶縁コイル)

<二律背反>

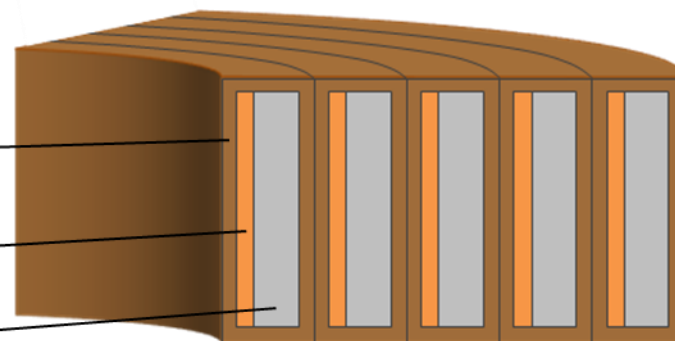


<パンケーキコイル巻線>

絶縁



無絶縁



・使用線材量の大幅削減、使用線材の歩留まり率の向上に期待(補足資料7)

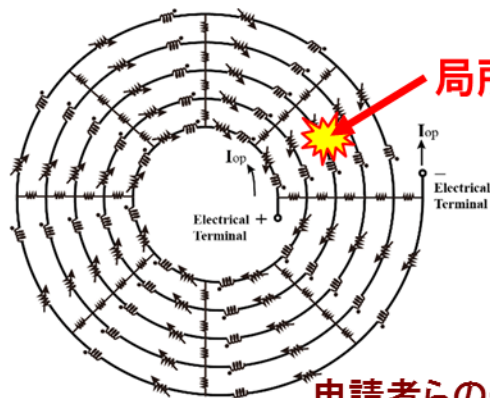
高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術(無絶縁コイル)

<保護を必要としない 無保護 コイル>

SPECIFICATIONS OF THE 60 TURNS' NI REBCO COIL

REBCO wire	Overall width; thickness (mm)	4.0; 0.063
	Copper stabilizer thickness (μm)	10 (5 per side)
Coil	Inner diameter (mm)	60.0
	Outer diameter (mm)	67.6
	Height (mm)	4.0
	Turns	60
	I_c at 77 K, self-field (A)	43
	B_z per amp at coil center (mT/A)	1.17
	Inductance (μH)	432.3
	Turn-to-turn contact resistance, R_c (μW)	534
	Contact surface resistivity, R_{ct} ($\mu\text{W}\cdot\text{cm}^2$)	70
	Storage energy(mJ)	194.5

X.Wang, et al. Supercond. Sci. Tech., Vol.26, No.3, 2013, 035012

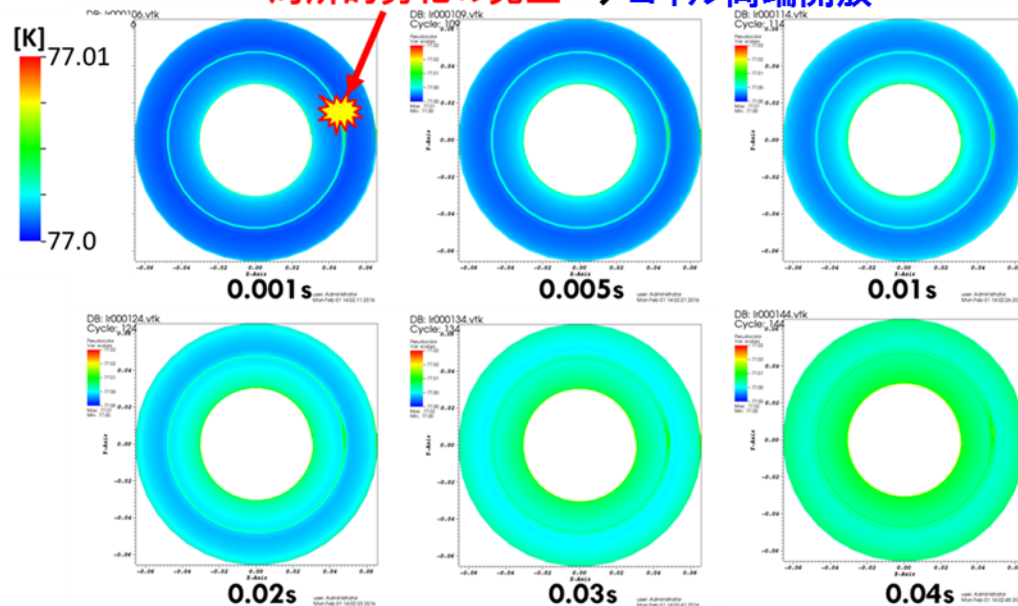


申請者らの先行研究

電流分布解析(部分要素等価回路)+温度分布解析(FEM)

T. Ohki, A. Ishiyama et al., IEEE Trans. on Applied Supercond., Vol.26, No.4, 2016, 470293

局所的劣化の発生 $\Rightarrow$ コイル両端開放



局所的な特性劣化が生じてても、ホットスポットが発生せず、コイル温度がほぼ一様に上昇

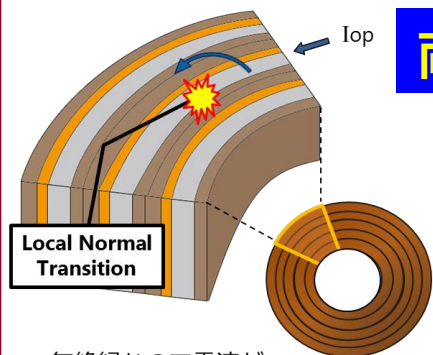
保護装置が不要

高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術(無絶縁コイル)

これまでの取り組み

無絶縁コイル技術の適用可能性

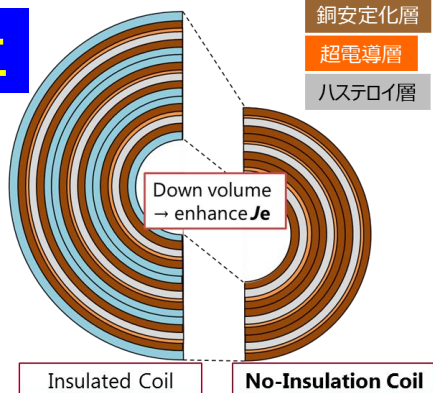
高熱的安定化



- ・無絶縁なので電流が自動的に局所的常電導転移を回避
- ・コイル全体の熱容量により常電導転移時のエネルギーを分担

➡ 従来のようなコイル保護が不要

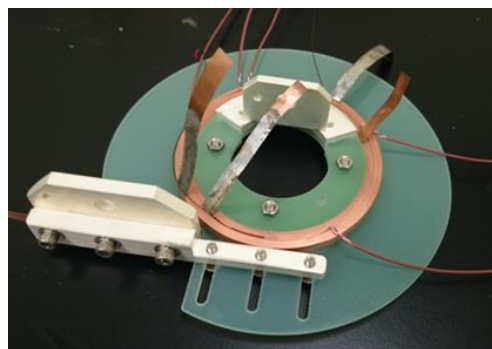
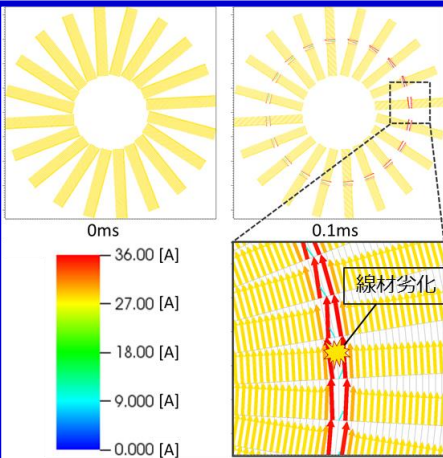
高電流密度化



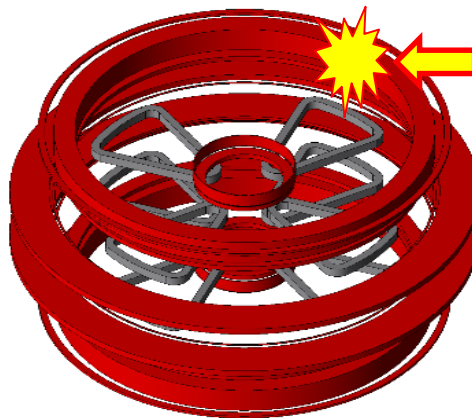
- ・安定化層の共有により銅安定化層厚を小さくできる
- ➡ 高電流密度化が可能

両立

電流・温度分布連成過渡解析

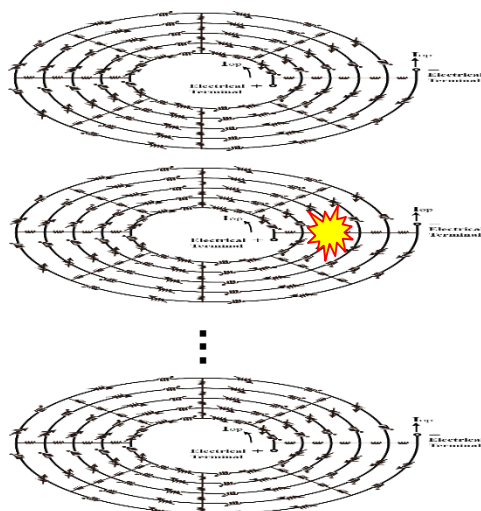


本研究 HTS-SCへの無絶縁コイル技術の適用



マルチコイルシステム内で局所的常伝導転移が起これば、コイルの発生磁場が変化し、他のコイルに誘導電流が発生する。

無絶縁コイルの場合、外部からコイル内の電流を制御できない。



電流・温度分布連成過渡解析

無絶縁マルチコイルの挙動解析・評価実験



マルチコイル化したときの無絶縁コイルの効果の検証と、常電導転移事故時の検出・保護法の確立

基盤研究S等

H 高磁場化・小型化

設計最適化技術

Super-YOROI コイル構造＋無絶縁コイル技術



H 高磁場精度化

不整磁場(遮蔽電流磁場)の解析・低減技術

5-**H**igh
基盤技術

H 高機械強度化

Super-YOROI コイル構造

＜課題解決の特徴＞
高度で精緻な数値解析と
検証実験の
両面からのアプローチ

H 高熱的安定化

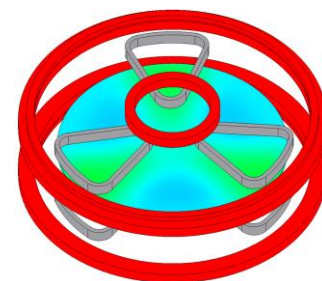
二律背反

H 高電流密度化

無絶縁コイル技術

5-High統合・革新的コイル化技術の開発

＜事前予備設計図＞

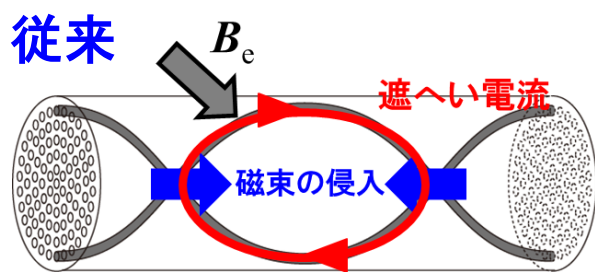


出力可変 Ultra-Baby HTS-SC用
マルチコイルシステムの
試作・実証実験（基盤研究S）

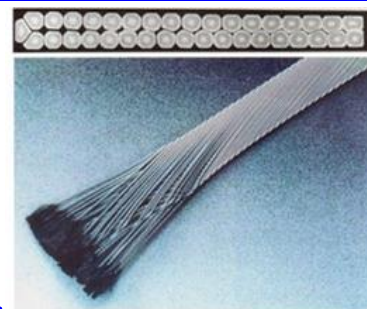
HTS-SC用REBCOマルチコイルシステムの設計原理・開発基盤の確立

高精度の磁場を発生する技術(遮蔽電流磁場の低減)

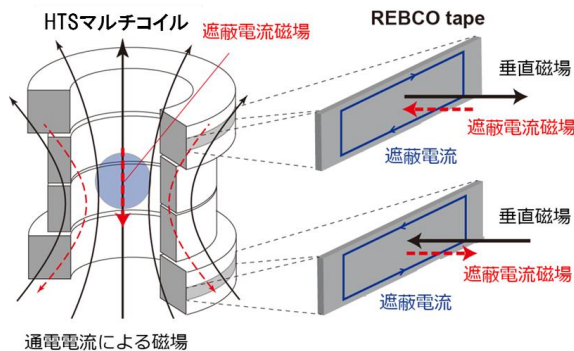
超電導コイルに巻線するREBCO線材は**テープ形状**
⇒ テープ面への垂直磁場によって遮蔽電流が顕著に誘導



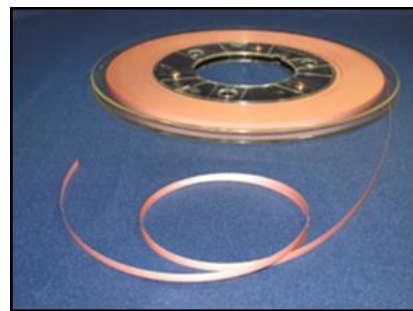
撚線構造：短い時定数の遮蔽電流



NbTiラザフォード導体

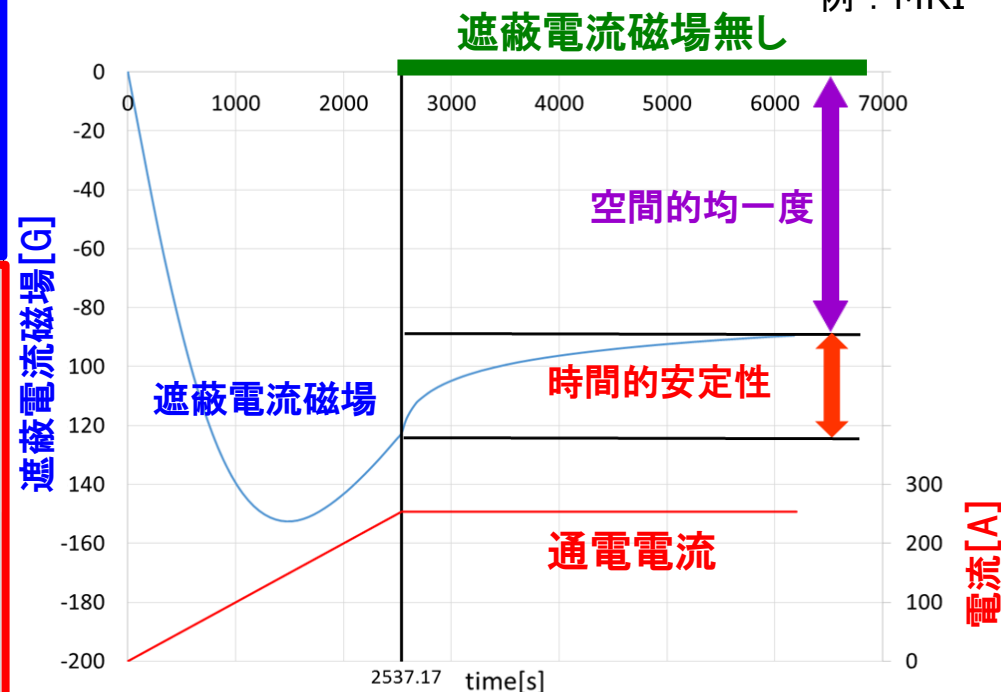


積層テープ構造：長時定数の遮蔽電流



REBCOテープ線材

⇒ **不整磁場(遮蔽電流磁場)を発生**



例：MRI

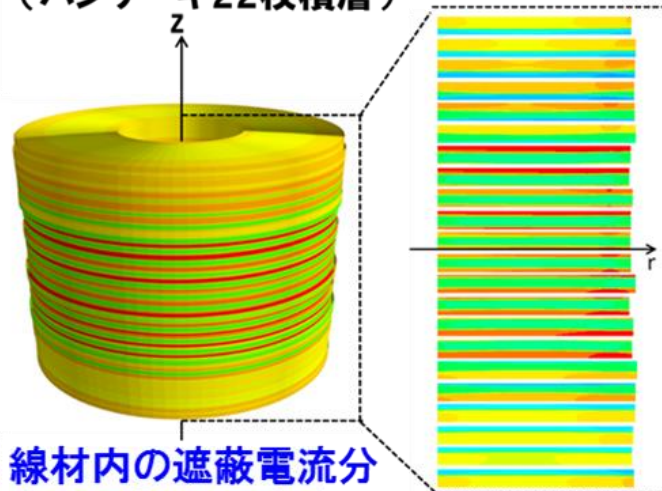
⇒ 磁場の**時間的変動**や、**空間的均一度**を大きく乱す**要因**となっている。
出力可変(多機能化)とするための最重要課題

高精度の磁場を発生する技術(遮蔽電流磁場の低減)

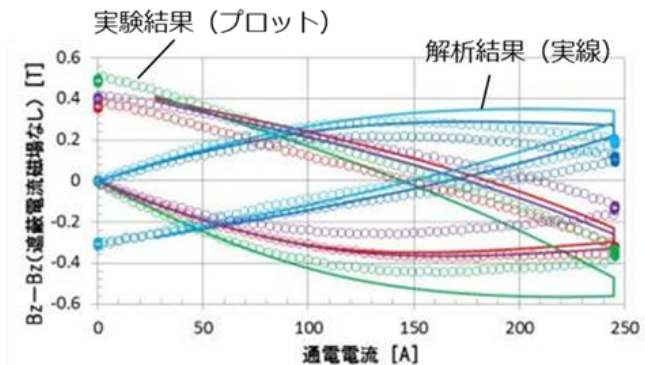
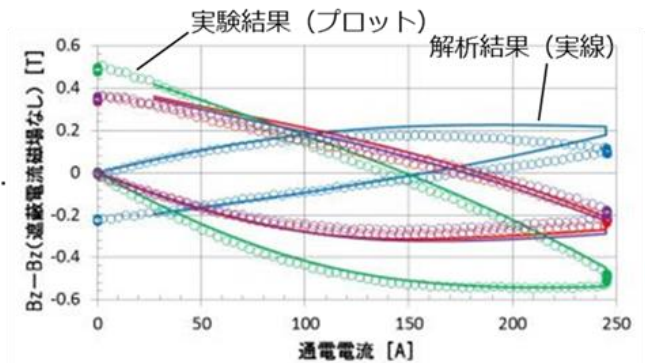
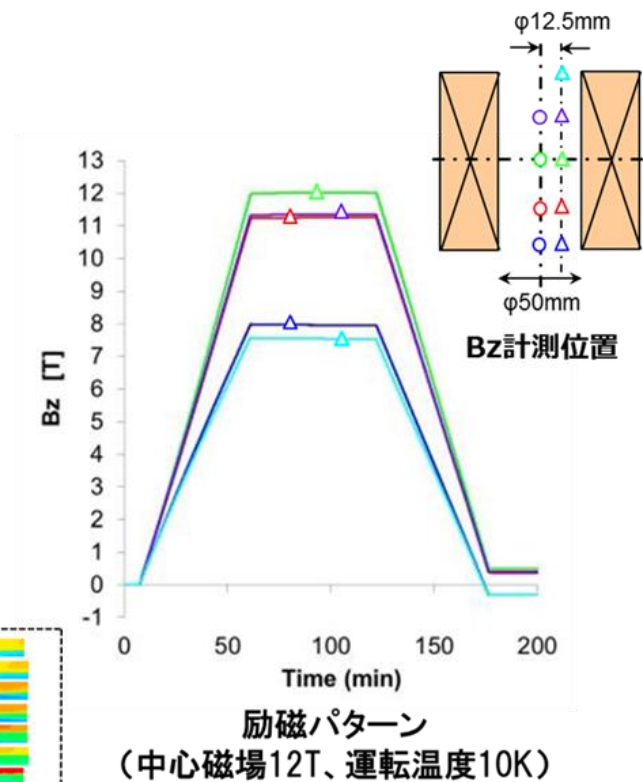
AMEDプロジェクトにて試作実験



小型コイル
(パンケーキ22枚積層)



線材内の遮蔽電流分布の可視化に成功



遮蔽電流磁場の実験結果と解析結果比較

遮蔽電流磁場が解析計算で予測可能であることを確認

H. Ueda, et al. "Numerical Simulation on Magnetic Field Generated by Screening Current in 10-T-Class REBCO Coil", IEEE trans. Appl. Supercond., 26, 701205 (2016).

高精度の磁場を発生する技術(遮蔽電流磁場の低減)

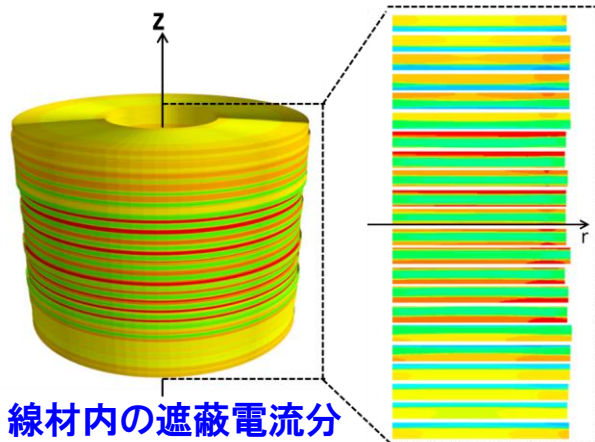
これまでの取り組み

AMEDプロジェクトにて試作

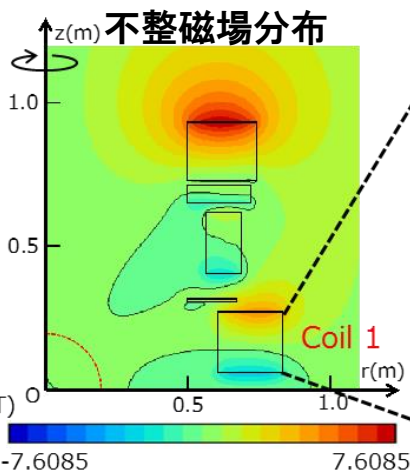


小型コイル
(パンケーキ22枚積層)

3D-非線形過渡電磁場 詳細解析



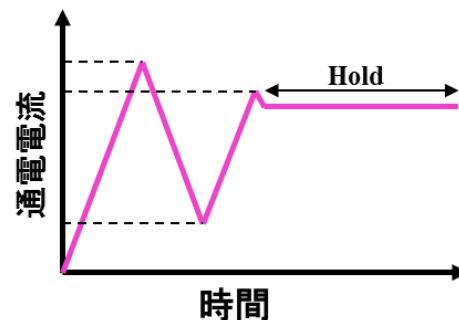
線材内の遮蔽電流分布の可視化に成功



9.4T全身用MRI高温超伝導コイルシステムにおける遮蔽電流に起因する不整磁場の影響評価

本研究 遮蔽電流磁場の低減法の確立

電流制御法



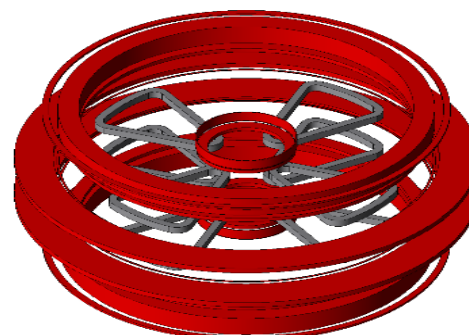
遮蔽電流磁場を低減する通電電流制御法の提案
特に、時間安定度の向上

細線化法



Iwakuma, Masataka et al. "Relaxation of Shielding Current in Test Coils for MRI With REBCO Superconducting Scribed Tapes." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 26 (2016): 1-5.

細線化の効果検証と効果を活かすコイル設計法の提案
特に、空間精度の向上



HTS-SC用マルチコイルシステム

★加速器に求められる
磁場精度 ($10^{-3} \sim 10^{-4}$)
の実現

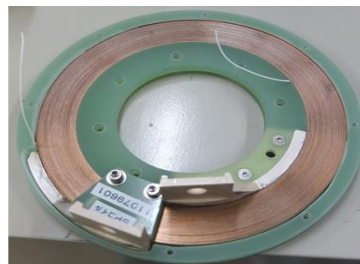
★出力変化時の即応性の
確保

基盤研究S等

H 高磁場化・小型化

設計最適化技術

Super-YOROI コイル構造＋無絶縁コイル技術



H 高磁場精度化

不整磁場(遮蔽電流磁場)の解析・低減技術

5-**H**igh
基盤技術

H 高機械強度化

Super-YOROI コイル構造

＜課題解決の特徴＞
高度で精緻な数値解析と
検証実験の
両面からのアプローチ

H 高熱的安定化

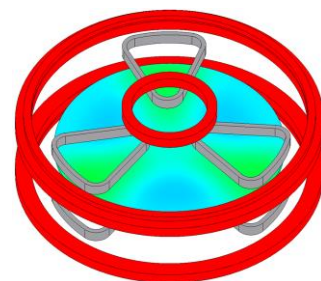
二律背反

H 高電流密度化

無絶縁コイル技術

5-High統合・革新的コイル化技術の開発

＜事前予備設計図＞



出力可変 Ultra-Baby HTS-SC用
マルチコイルシステムの
試作・実証実験（基盤研究S）

HTS-SC用REBCOマルチコイルシステムの設計原理・開発基盤の確立

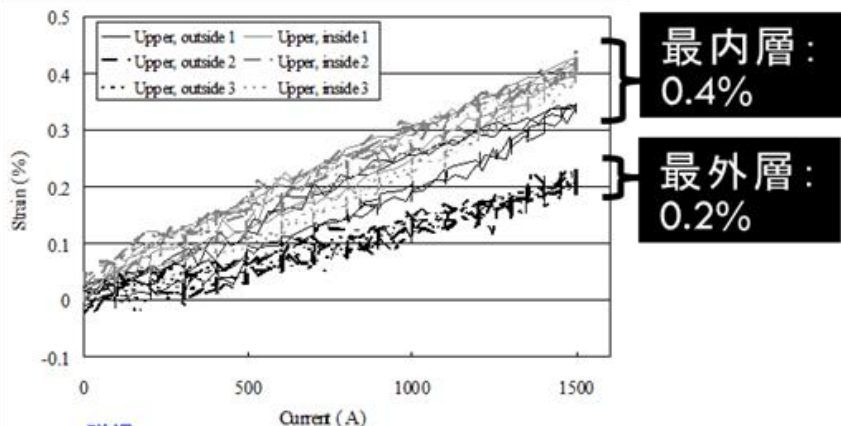
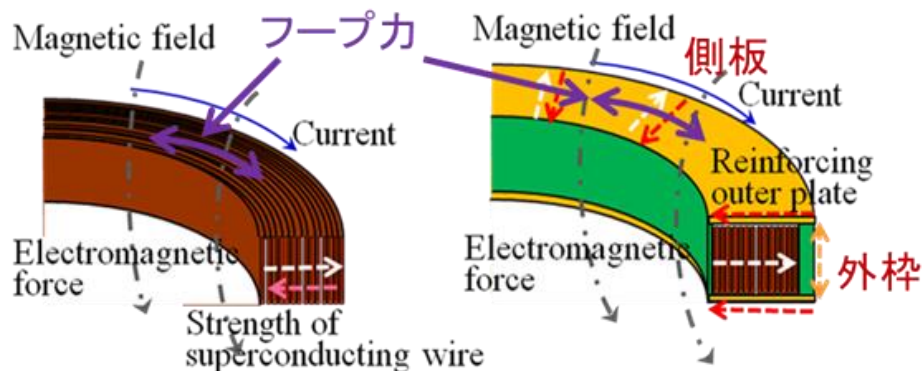
YBCO線材の強度のみに依存するのではなく、コイルを構成する枠と側板によって、作用する電磁力(フープ力)をコイル構造体全体で支える

ダブルパンケーキモデルコイルの実験結果

1500 A通電 @4.2 K, 8 T

⇒ 補強なしで最大1.75GPa(BJR)

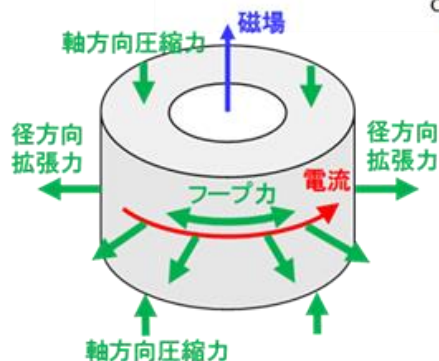
(当時世界最高値。第60回電気科学技術奨励賞)



Conventional structure
従来のコイル構造



Yoroi-coil structure
YOROIコイル



本研究 円形・非円形コイルシステムへ



S. Nagaya, T. Watanabe, T. Tamada, M. Naruse, N. Kashima, T. Katagiri, N. Hirano, S. Awaji, H. Oguro, A. Ishiyama, "Development of High Strength Pancake Coil with Stress Controlling Structure by REBCO Coated Conductor," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no. 3, 4601204 (2013)

★圧倒的な高機械強度化による小型化・必要使用線材量の削減

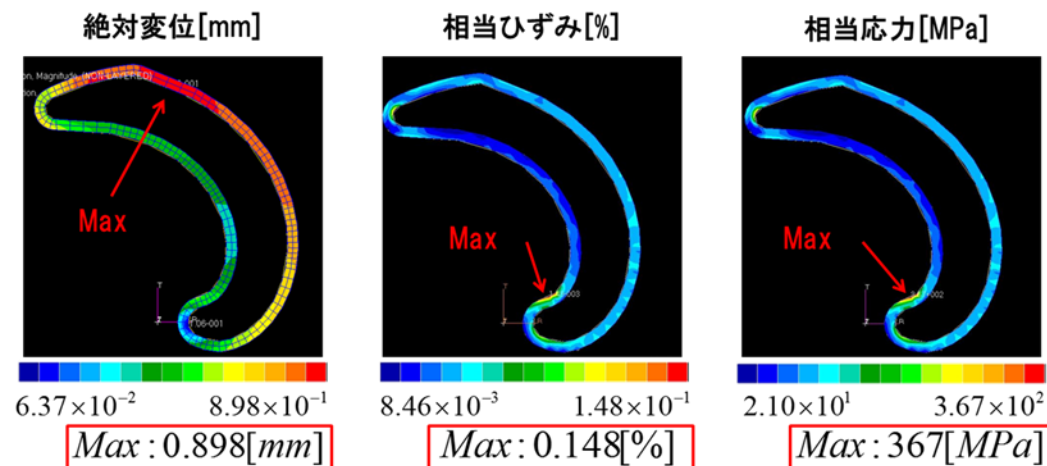
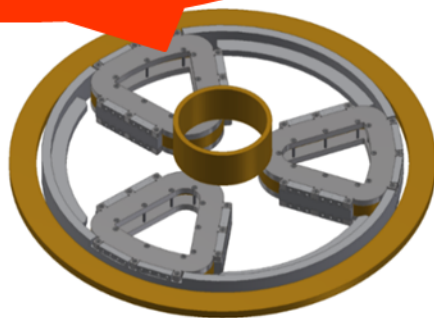
超伝導コイル巻線に作用するフープ応力(電磁応力)は、磁束密度 B と電流密度 J および半径 R の積($B \times J \times R$)で表される。従って大口径(R)のコイルで高磁場(B)を発生させるには、コイルの機械的強度の向上が不可欠となる。そして、**機械的強度が高められれば、より高電流密度(J)での設計ができることになり、その結果コイルの小型化・使用線材量の削減が期待できる。**

$F_L = B \times J \times R \Rightarrow \text{大} \Rightarrow \text{電流密度 } J \Rightarrow \text{大} \Rightarrow \text{使用線材量} \Rightarrow \text{減}$

高温超伝導サイクロトロンの例

H.Ueda, A.Ishiyama et al., IEEE Trans. on Applied Supercond., Vol.23, No.3, 2013, 4100205

機械強度を高めないと、
超伝導線材の特性を
活かすことができない



結果から見られる傾向として

- 最大変位が非常に小さく抑えられている
- 応力の集中は見られるものの強度限界内に収まっている



YOROI構造の実規模非円形SSCに対する有用性が高い

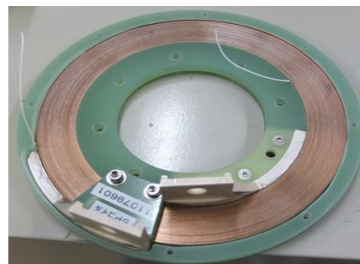
↓ 10²~10³低減

基盤研究S等

H 高磁場化・小型化

設計最適化技術

Super-YOROI コイル構造＋無絶縁コイル技術



H 高磁場精度化

不整磁場(遮蔽電流磁場)の解析・低減技術

5-**H**igh
基盤技術

H 高機械強度化

Super-YOROI コイル構造

H 高熱的安定化

二律背反

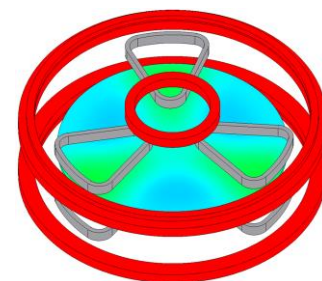
H 高電流密度化

無絶縁コイル技術

＜課題解決の特徴＞
高度で精緻な数値解析と
検証実験の
両面からのアプローチ

5-High統合・革新的コイル化技術の開発

＜事前予備設計図＞



出力可変 Ultra-Baby HTS-SC用
マルチコイルシステムの
試作・実証実験（基盤研究S）

HTS-SC用REBCOマルチコイルシステムの設計原理・開発基盤の確立

HTS-SC用実規模マルチコイルシステムの設計最適化

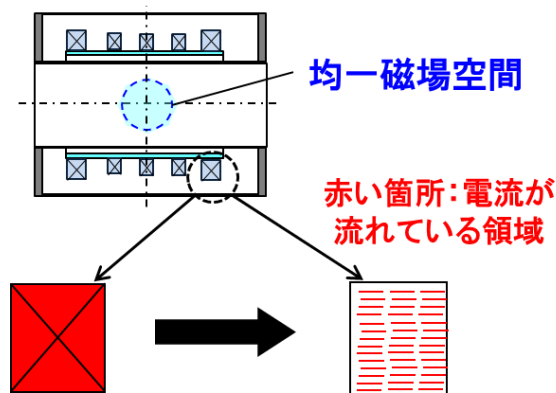
これまでの取り組み



REBCO線材

例えば、9.4T-全身用MRI

テープ形状に伴う、コイル寸法等の新たな制約
下での均一磁場設計技術、磁石製造技術



空間電流密度の仮定
で磁場均一度10ppm
以下になるように設計

電流が流れている領域
を実線材の条件で計算
すると磁場均一度は
1000 ppm以上に悪化

本研究 最適設計: 小型化・低コスト化(使用線材量最小化)

目的関数: 使用線材量

制約条件付き非線形最適化手法

制約条件: 磁場均一度、超伝導特性、電磁応力など

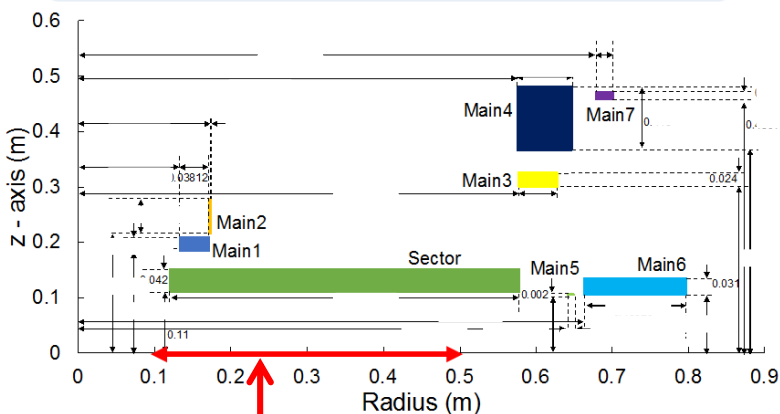
設計変数: コイル巻数、コイル通電電流、コイル位置など

設計仕様・コイル

6対の円形コ

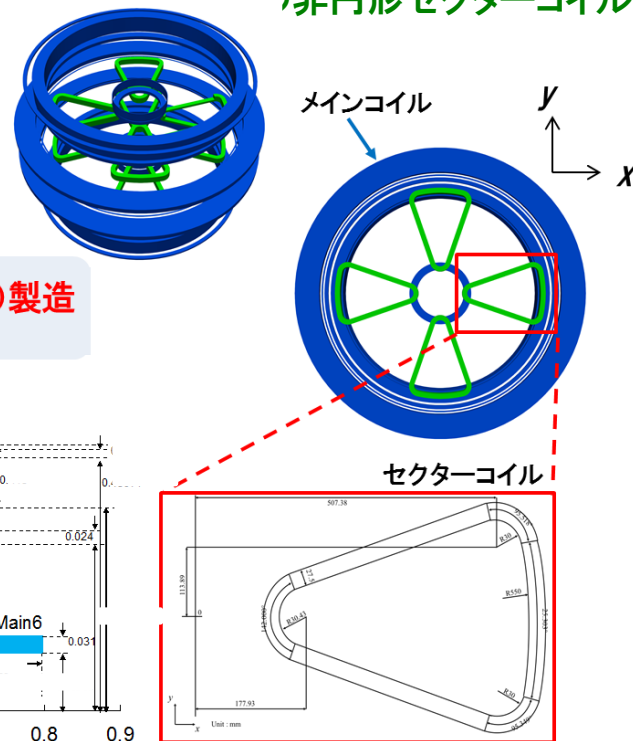
加速粒子	重水素イオン D^+
取出時粒子エネルギー	40 MeV
取出半径	0.5 m

α 線内用療法用ラジオアイソトープ(RI)製造
(エネルギー可変 = 他用途への活用可能)



評価範囲(加速領域): 半径0.1~0.5 mの周方向(360°)ミッドプレーン上

4対の非円形セクターコイル

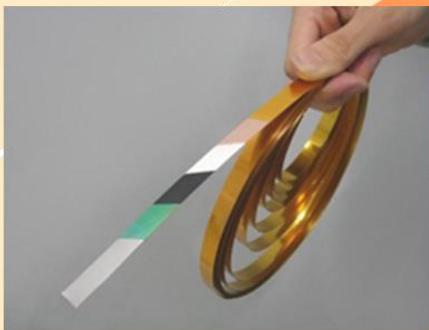


まとめにかえて：高温超伝導コイル化技術開発の現状

現状

- ・多くの技術的課題が浮き彫りに
- ・巻線・コイル化技術の確立急務
例えば、線材剥離、遮蔽電流、
常伝導転移検出・保護法など

巻線・コイル化技術



線材開発

- ・製品化
- ・圧倒的に優れた超伝導特性
- ・長尺化・低コスト化が課題

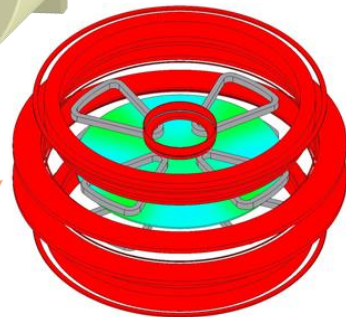
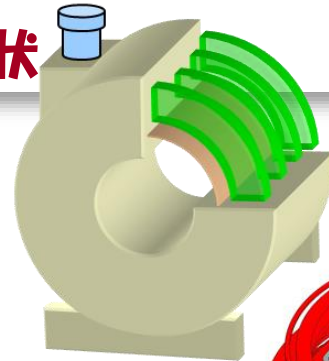
非円形コイル



用途に応じた高度の マルチコイル化技術



円形コイル



スケルトン・サイクロロン用
マルチコイルシステム

- ・機械・構造設計技術
冷却時の熱応力、励磁時の電磁応力
特性等の把握
- ・熱設計技術
冷却特性・励磁時や常伝導転移事故時
の発熱・温度上昇特性等の把握
- ・電磁設計技術
超伝導線材特有の電流-電圧特性、非
線形磁化特性等の把握
- ・コイル設計最適化



ご清聴ありがとうございました

