



「超伝導」と「超電導」

高温超伝導コイル技術の現状と がん治療用サイクロトロンへの応用

早稲田大学 理工学術院 共同原子力専攻 石山敦士

2024.3.23



高温超伝導コイル技術の現状

超電導線材を巻線したコイル応用

・完全導電性 ($R=0$)

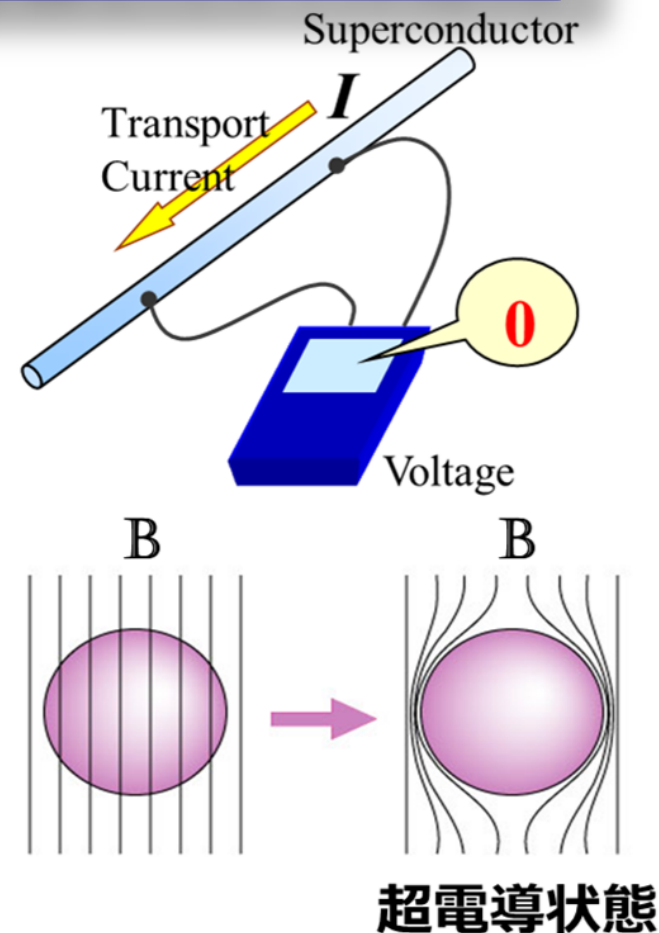
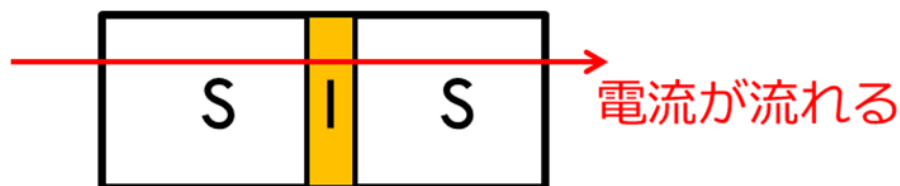
電気抵抗が『0』となるため、大きな直流電流を流し続けることができる

・マイスナー効果 (完全反磁性)

超電導状態において磁場は超電導体の内部に侵入しない

・ジョセフソン効果

電圧降下を生じないトンネル効果



特殊で魅力的な超電導現象の応用

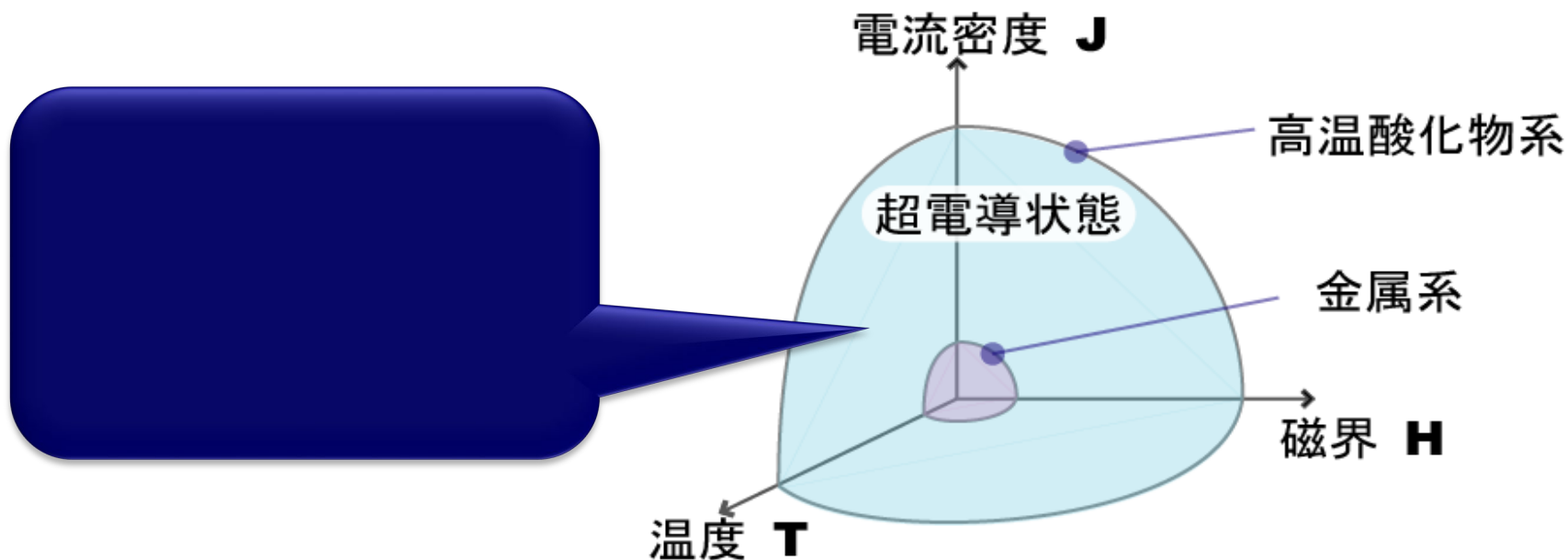
超電導状態を維持するためには (コイル応用)

超電導特性を決める3つの臨界値

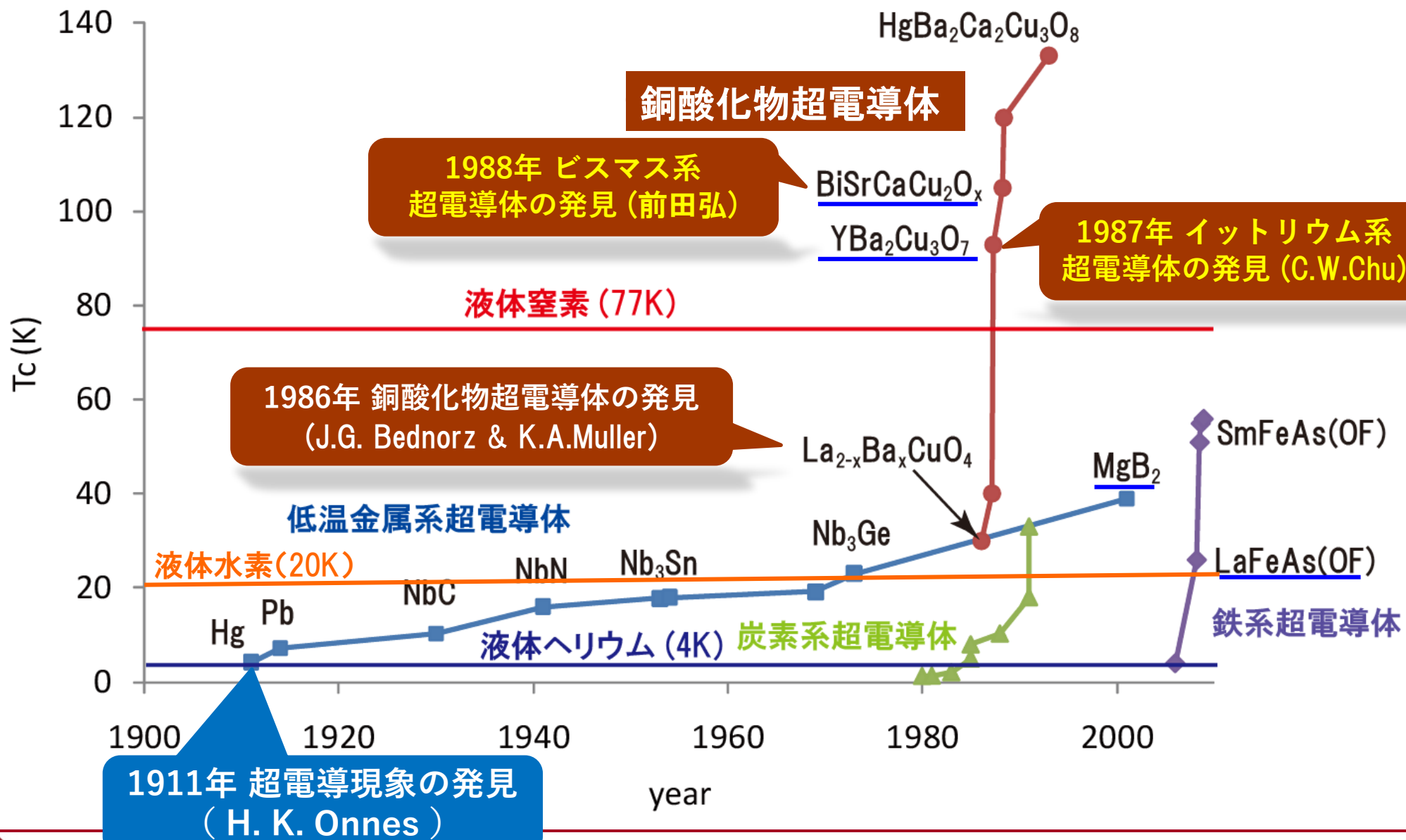
臨界温度: T_c

J_c

臨界磁界: H_c



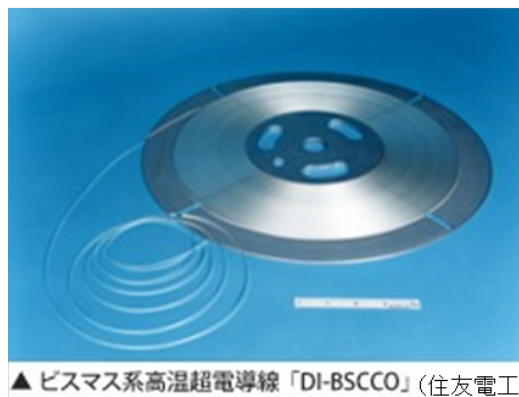
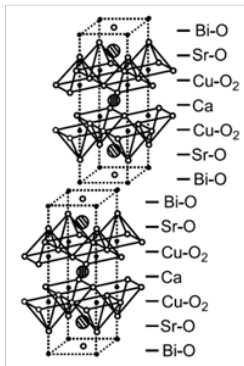
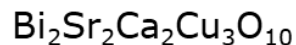
超電導体発見の歴史(臨界温度)



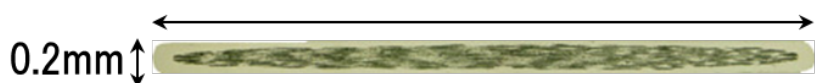
市販されている高温銅酸化物系超電導線材 (酸化銅を含む化合物)

ビスマス系超電導線材

Bi2223 ペロブスカイト構造

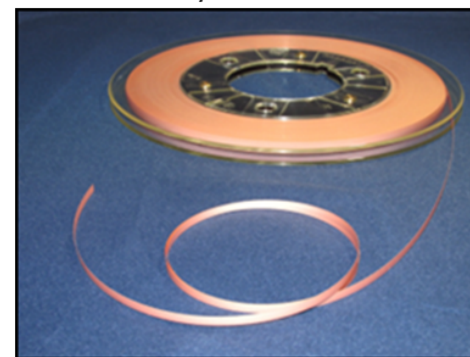
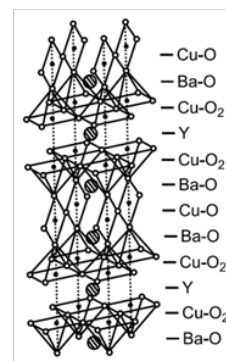
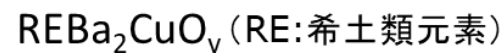


4mm

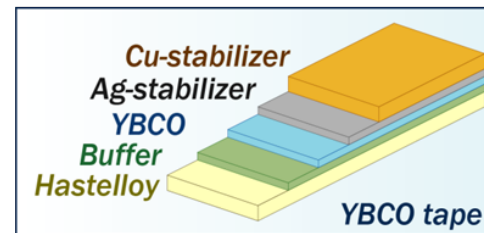


希土類系超電導線材

REBCO



4~10mm



多芯線

薄膜線(コート線)

いずれもアスペクト比の非常に大きなテープ形状

超電導状態を維持するためには（コイル応用）

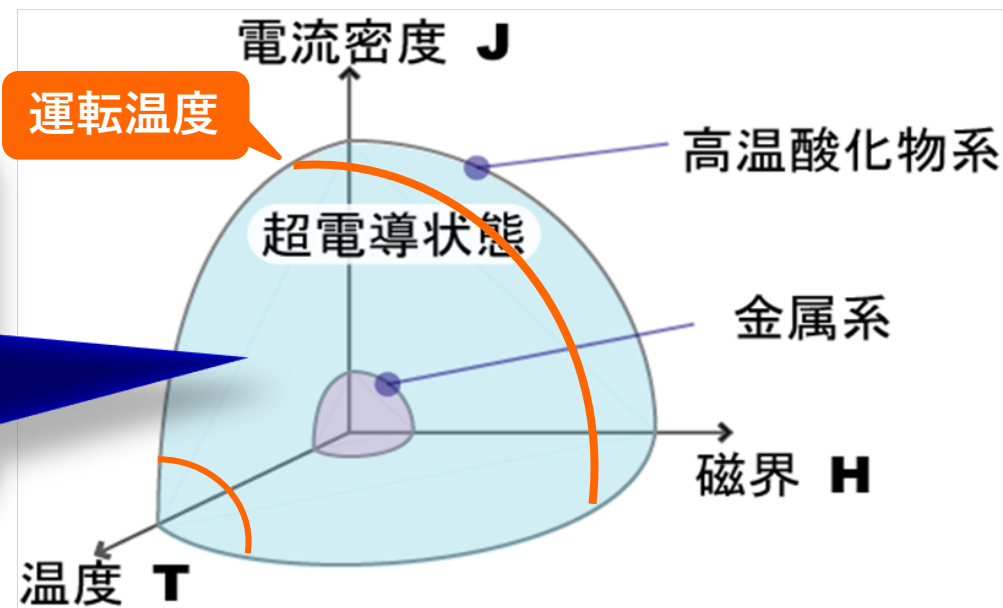
超電導特性を決める3つの臨界値

臨界温度： T_c

臨界電流密度： J_c

臨界磁界： H_c

3つの臨界値で囲まれた範囲が超電導状態範囲外は常電導状態



超電導の発見(ゼロ抵抗の発見)



ヘイケ・カメルリング・オンネス
(Heike Kamerlingh Onnes)

1908年 ヘリウム液化に成功(4.2K)

1911年 水銀でゼロ抵抗を発見

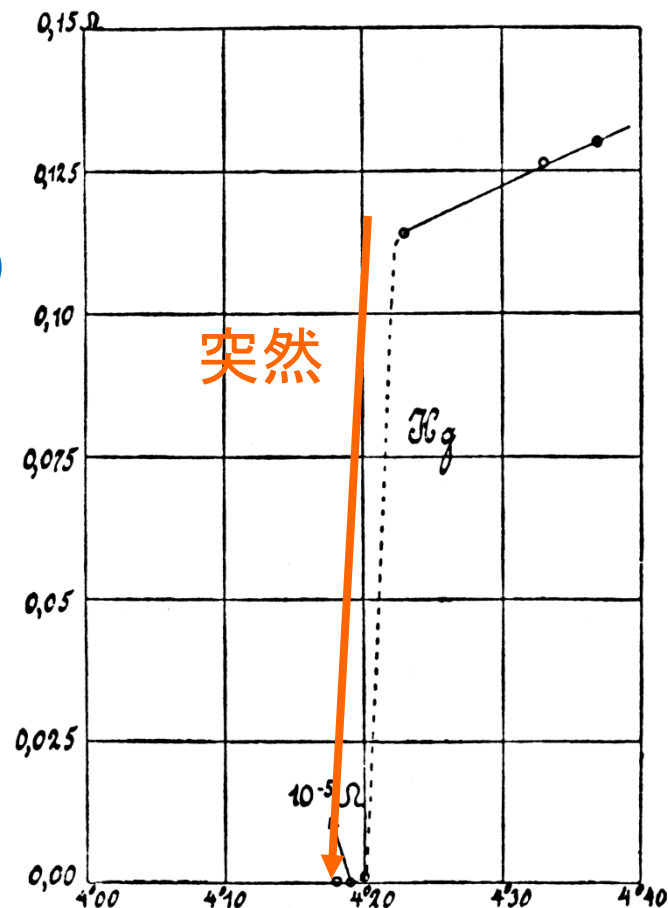
1913年 ノーベル物理学賞

ある種の物質を極低温に冷却するとある温度以下で**突然**電気抵抗がなくなる現象

超電導状態
(superconducting state)

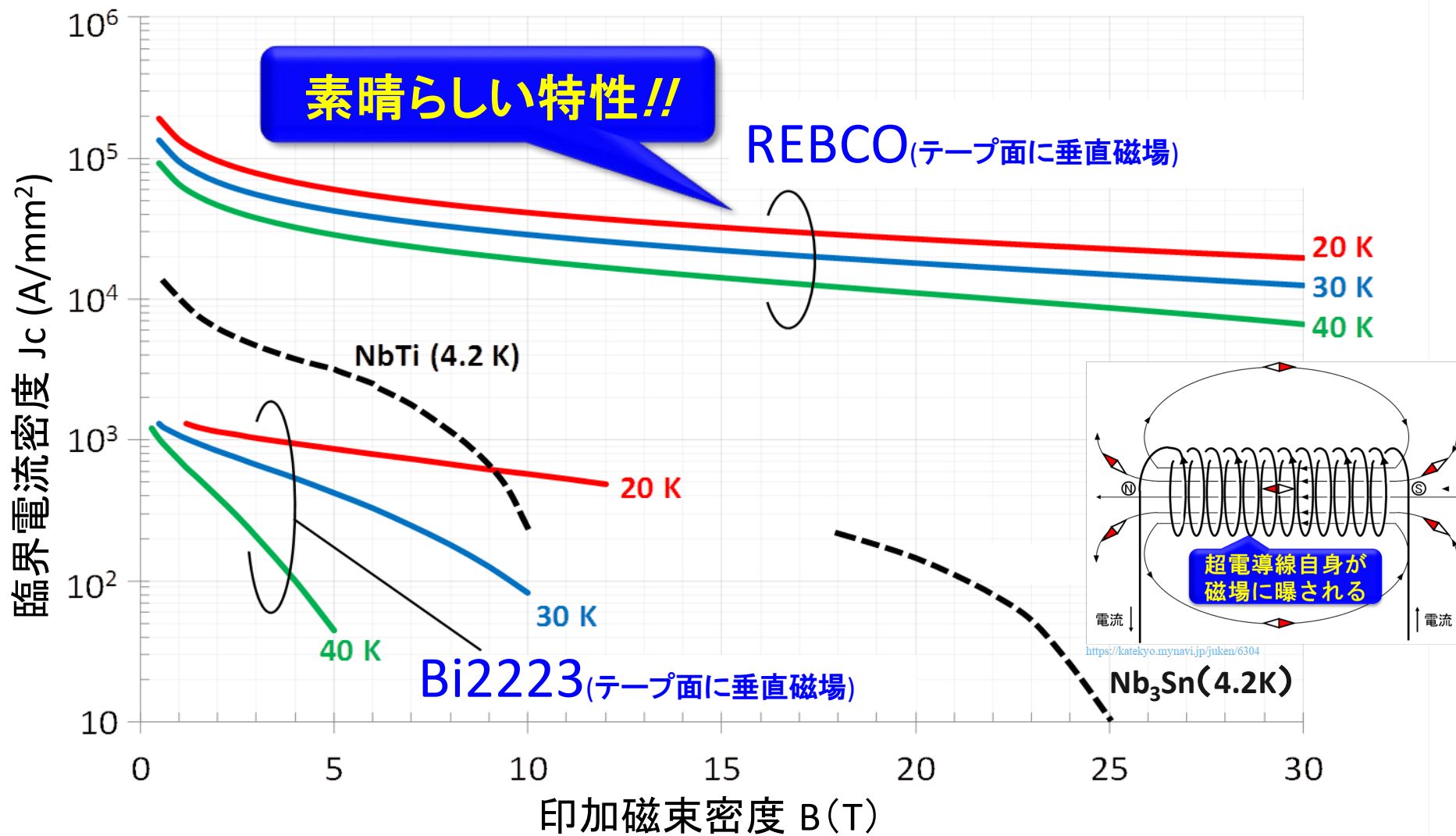


常電導状態
(normal conducting state, normal state)



*Akad. Van Wetenschappen
(Amsterdam) 14(1911) 818*

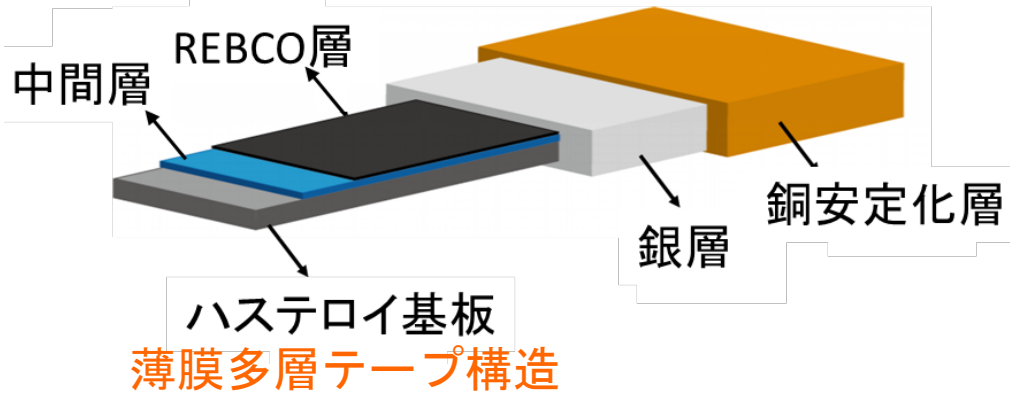
超電導体の臨界特性 (J_c - B 特性)



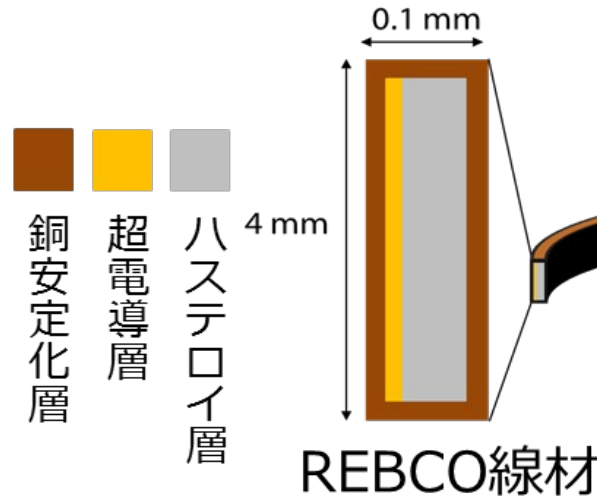
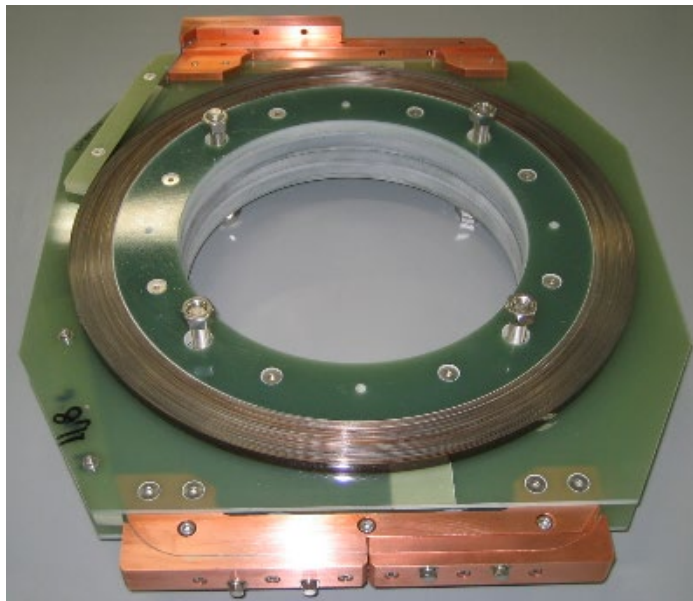
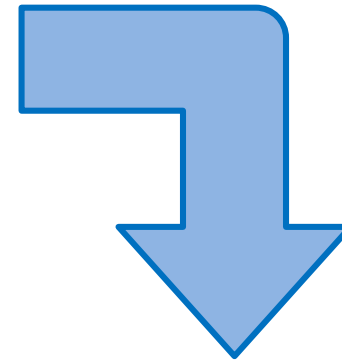
超電導体の発見: ~10000

コイル用線材: ~10

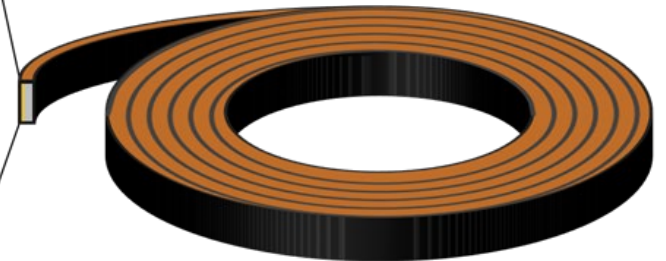
REBCO系超電導テープ線材を用いたパンケーキコイル



パンケーキ巻き

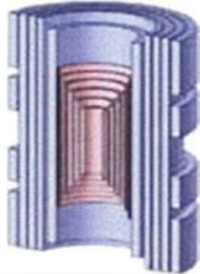
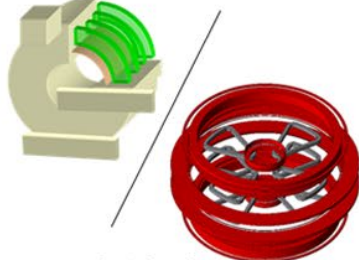
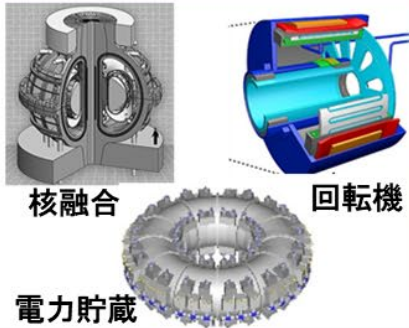


パンケーキコイル



期待されるREBCO系超電導コイルの応用

少電力で大空間に高磁場・良質な磁場を発生可能な高効率エネルギー変換機器

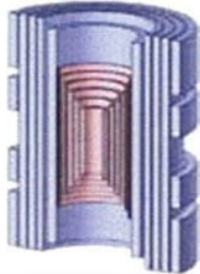
	NMR	MRI/サイクロトロン	低炭素化応用
運転パターン	DC	DC	DC/パルス/励磁減磁の繰返し/変動磁場下...
発生磁場	>30T	~10T	~10T
電流密度	数百A/mm ²	数百A/mm ²	数百A/mm ²
口径	数cm	数十cm~1m	数十cm~1m
運転温度	4.2K (熱容量:小)	>20K (熱容量:大)	>20K (熱容量:大)
電磁力(フープ応力)	BJR > 数百Mpa	BJR > 数Gpa	BJR > 数Gpa
コイルシステム	<p>超高磁場磁石</p> 	<p>高磁場全身用MRI</p>  <p>サイクロトロン</p>	 <p>核融合</p> <p>回転機</p> <p>電力貯蔵</p>



がん治療用サイクロトロンへの応用

期待されるREBCO系超電導コイルの応用

少電力で大空間に高磁場・良質な磁場を発生可能な高効率エネルギー変換機器

	NMR	MRI/サイクロトロン	低炭素化応用
運転パターン	DC	DC	DC/パルス/励磁減磁の繰返し/変動磁場下...
発生磁場	>30T	~10T	~10T
電流密度	数百A/mm ²	数百A/mm ²	数百A/mm ²
口径	数cm	数十cm~1m	数十cm~1m
運転温度	4.2K (熱容量:小)	>20K (熱容量:大)	>20K (熱容量:大)
電磁力(フープ応力)	BJR > 数百Mpa	BJR > 数Gpa	BJR > 数Gpa
コイルシステム	<p>超高磁場磁石</p> 	<p>高磁場全身用MRI</p>  <p>サイクロトロン</p>	 <p>核融合</p> <p>回転機</p> <p>電力貯蔵</p>

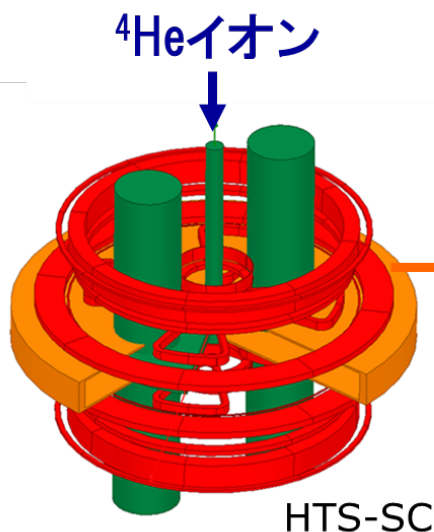
REBCOコイルの応用例（サイクロトロン）

科研費基盤研究S（2018年～2022年度） 課題番号:18H05244

「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」

<研究開発目標>

進行がん（多発性遠隔転移等）への効果が期待されている「**標的 α 線核医学治療**」の普及の鍵となる α 線放出RI(^{211}At)の**多量・安定・分散生産**のための超小型・高強度・エネルギー可変（世界初）の**加速器「高温超伝導スケルトン・サイクロトン（「HTS-SC」と略記）」**を開発する。



名前の理由は後で

^{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。

ターゲット

^{209}Bi

反応

$^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$

研究体制

研究代表者 石山敦士(早稲田大学・理工学術院)・超伝導工学
研究分担者 野口聡(北海道大学・情報科学研究科)・超伝導工学
植田浩史(岡山大学・自然科学研究科)・超伝導工学
福田光宏(大阪大学・核物理研究センター)・加速器
鷲尾方一(早稲田大学・理工学術院)・加速器
東 達也(QST・放射線医学総合研究所)・腫瘍核医学

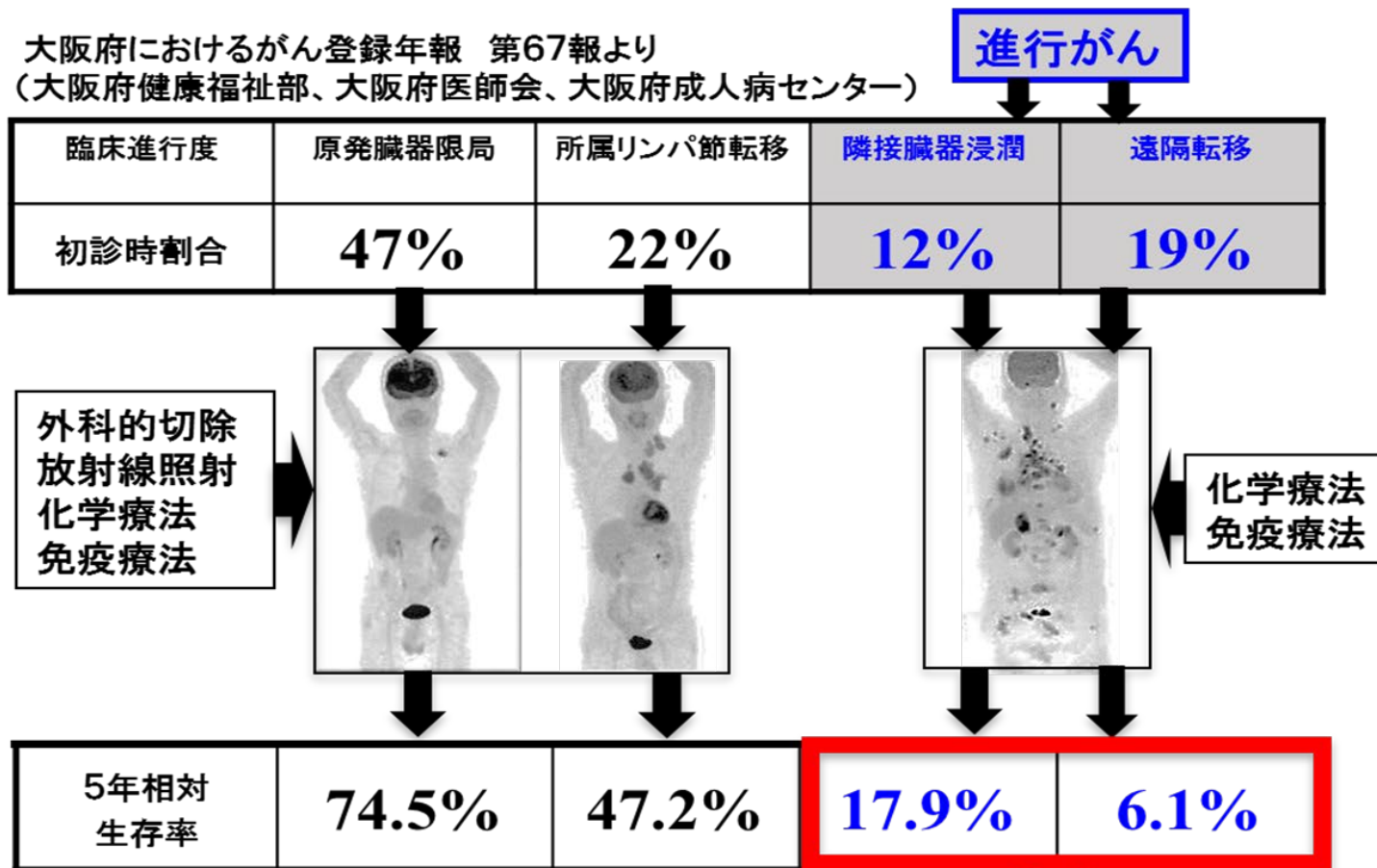
公益財団法人「低温工学・超電導学会」2020年度業績賞「学術賞」を受賞

REBCOコイルの応用例 (サイクロトロン)

標的 α 線核医学治療(α 線内用療法)への期待

初診時に1/3の患者が「進行がん」:5年相対生存率は15%以下

大阪府におけるがん登録年報 第67報より
(大阪府健康福祉部、大阪府医師会、大阪府成人病センター)

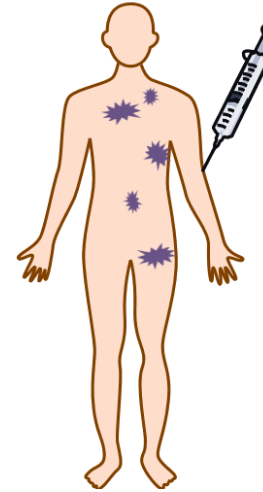


難治性がん(多発性転移がん)の征圧

アルファ線内用療法の適用

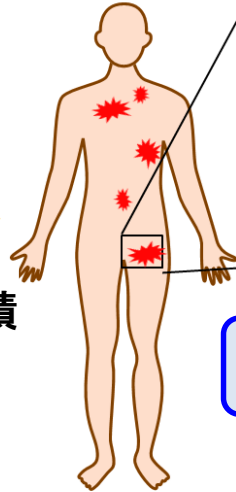
本研究のターゲット: 標的α線核医学治療普及のための課題

進行がん患者

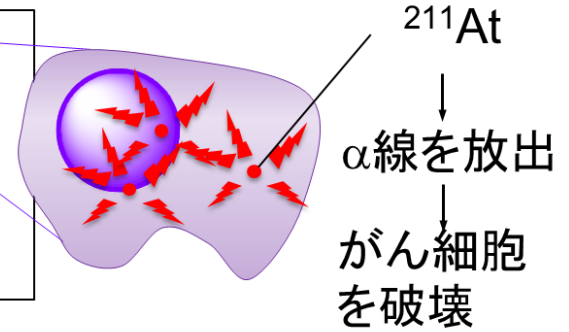
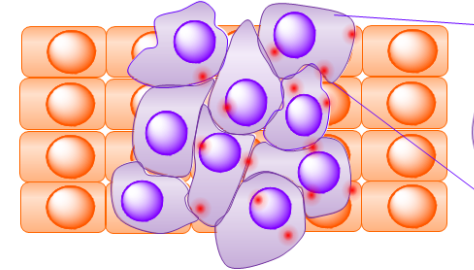


α線放出RI(^{211}At)を含む標的剤を投与

自発的にがん細胞に集積



＜進行がん治療の道を拓く治療法＞



RI(^{211}At)から放出されたα線が、がん細胞を殺滅

飛程: 約55 μm 半減期: 7.2時間

メリット

- ・ 短い飛程: 周辺臓器への影響少ない
- ・ 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

放射線や粒子線治療(外用療法)と異なり、人体への直接照射は行わない

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

現状:
放医研・阪大核物理研究センター等の大型施設を利用

高温超伝導
スケルトン・サイクロトロン

サイクロトロンに必要な磁場

等時性

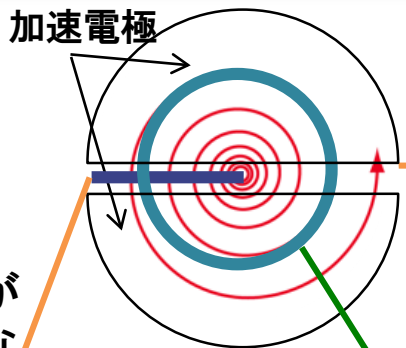
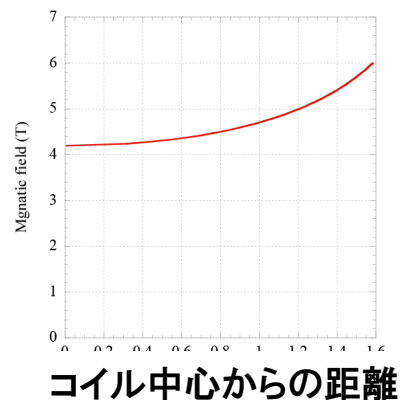
粒子が一周する間にかかる時間が同じになる

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

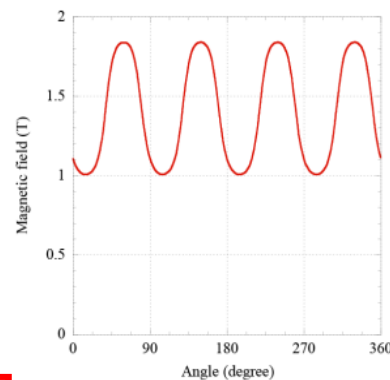
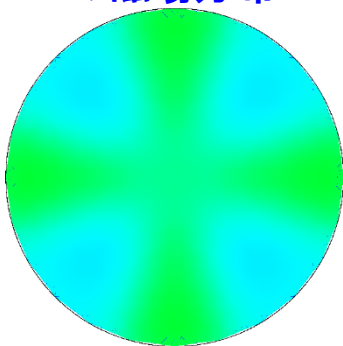
mid-planeからはずれた粒子は発散する。

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

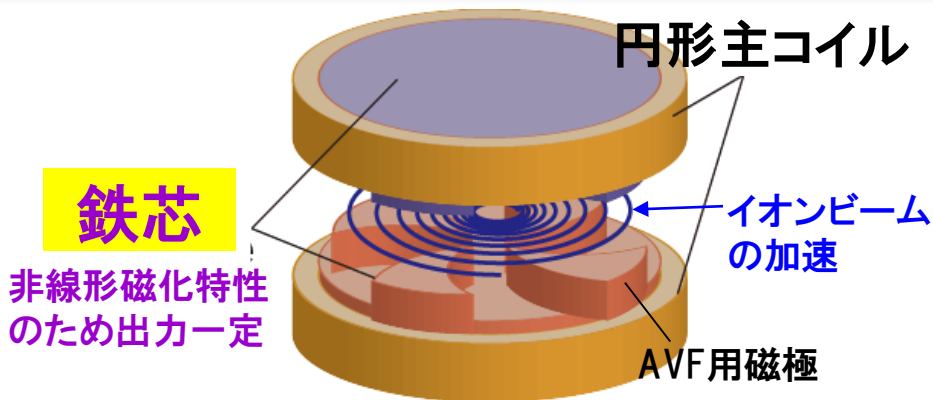


高精度の磁場分布($10^{-3} \sim 10^{-4}$)必要

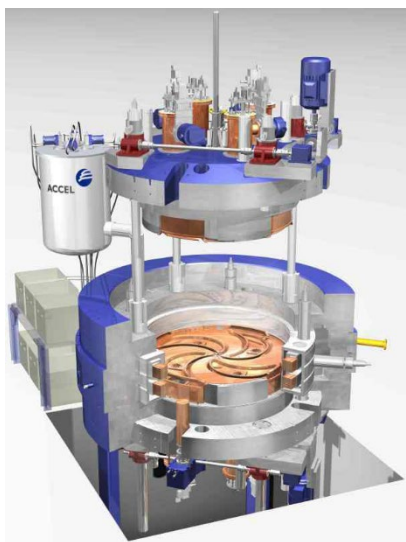
コイル周方向

世界初の高温超伝導加速器「スケルトン・サイクロトロン」

HTS-SC(高温超伝導-スケルトン・サイクロトロン)



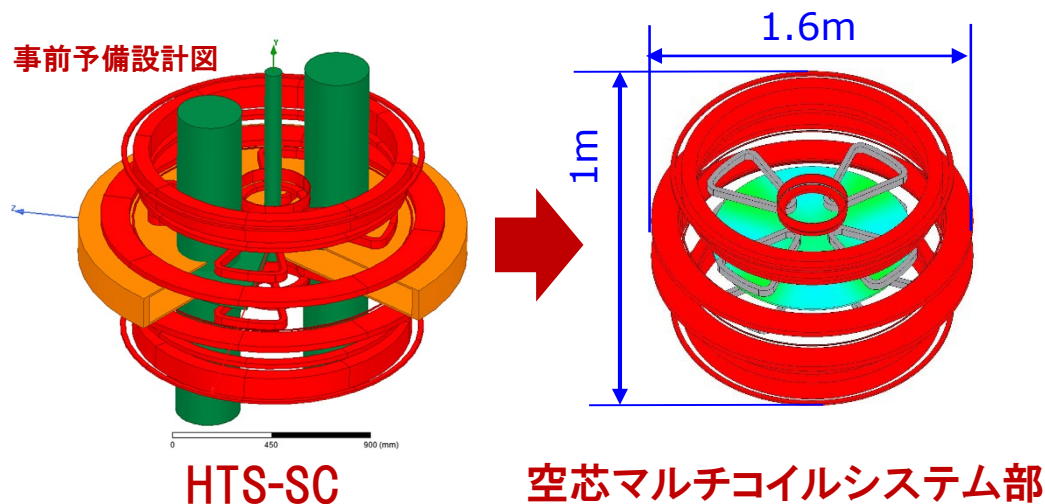
従来のAVFサイクロトロン



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

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

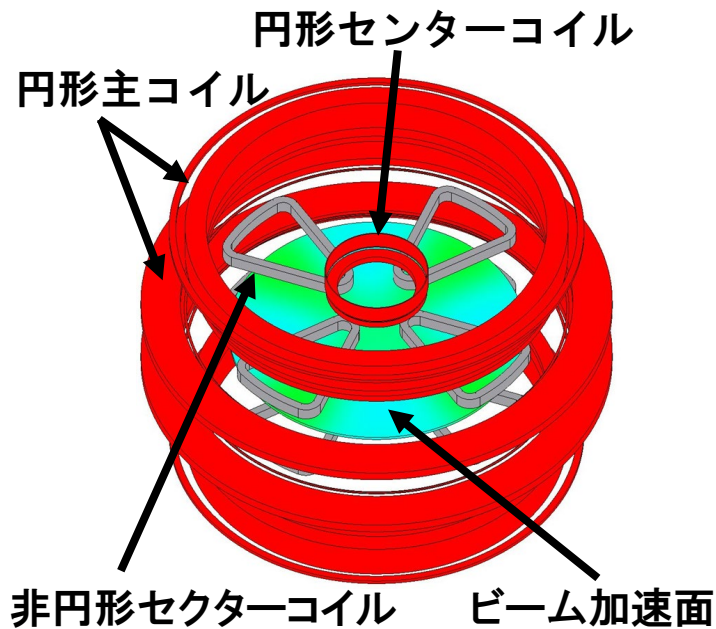


^{211}At **多量**製造 (36MeV, $500 \mu A$)

超小型軽量・大強度を実現!

超小型: 病院内設置可
高強度: 製造量の増加

エネルギー可変・多機能「スケルトン・サイクロトロン」



- ・鉄の非線形磁化特性の影響なし
- ・空間自由度を活かした機器構成・配置による電磁場形成が実現でき、大電流のビームを集束させながら安定して加速し引出可能。

特許「空芯型サイクロトロン」 石山敦士、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)

空芯コイルの適用によって、、、

超小型軽量・大強度に加えて

エネルギー可変(多機能)サイクロトロンの実現

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

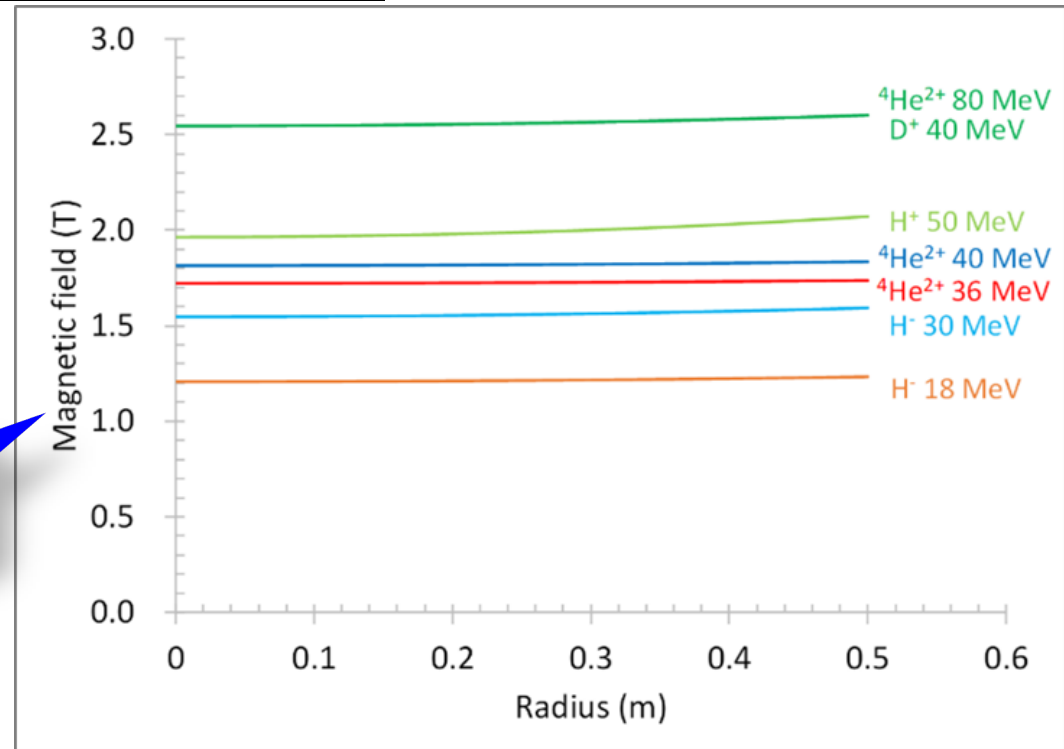
エネルギー:40MeV, 加速面平均磁場:2.589T

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!

エネルギー可変(多機能)「スケルトン・サイクロトロン」

Ion	Energy (MeV)	Bave(T)@0.5m	Applications
<u>${}^4\text{He}^{2+}$</u>	36	1.732	α -therapy, ${}^{211}\text{At}$
${}^4\text{He}^{2+}$	40	1.826	γ -SPECT, ${}^{210}\text{At}$
${}^4\text{He}^{2+}$	80	2.589	K-number
<u>H^-</u>	18	1.232	PET-CT, ${}^{225}\text{Ac}/{}^{213}\text{Bi}$
H^-	30	1.596	BNCT, ${}^{99}\text{Mo} - {}^{99\text{m}}\text{Tc}$
H^-	50	2.071	BNCT, ${}^{99}\text{Mo} - {}^{99\text{m}}\text{Tc}$
<u>D^+/H_2^+</u>	40	2.589	BNCT, ${}^{99}\text{Mo} - {}^{99\text{m}}\text{Tc}$

加速粒子とその応用



粒子加速のための等時性磁場

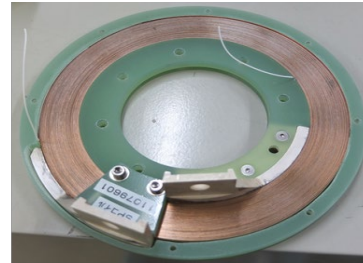
科研費(基盤研究): HTS-SC用REBCOコイルシステムの開発

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

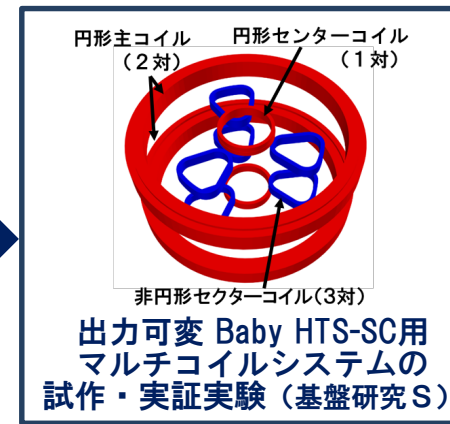
二律背反

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

1/2スケール小型実証用コイル



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

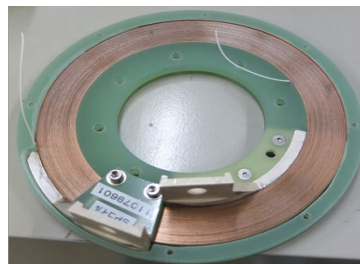
科研費(基盤研究): HTS-SC用REBCOコイルシステムの開発

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

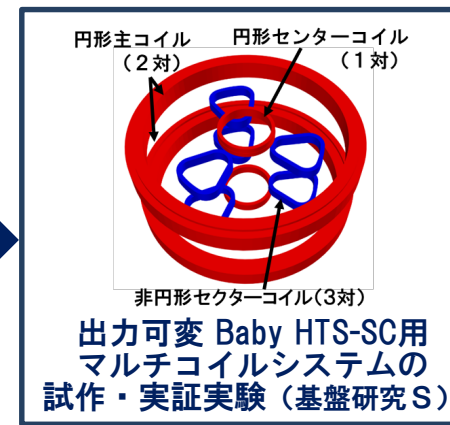
二律背反

H 高電流密度化

無絶縁(NI)コイル技術

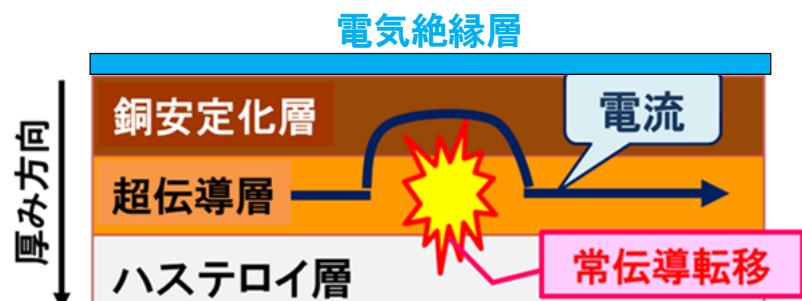
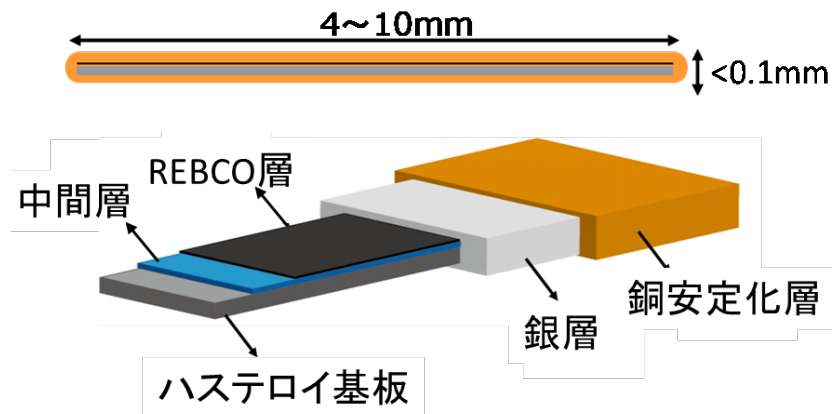
5-High統合・革新的コイル化技術の開発

1/2スケール小型実証用コイル

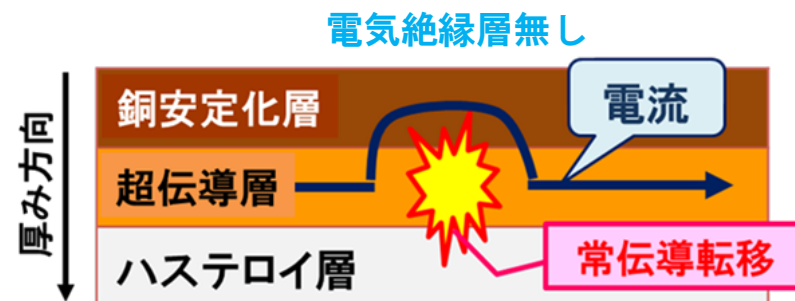
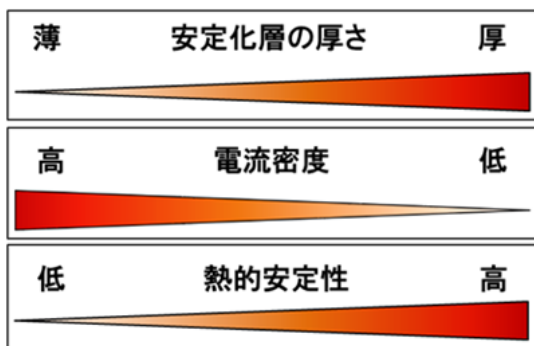


HTS-SC用REBCOマルチコイルシステムの設計原理・開発基盤の確立

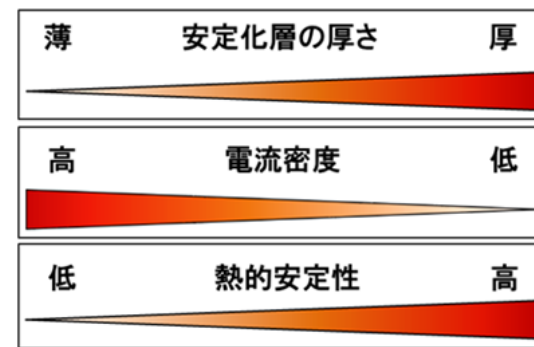
高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術(無絶縁コイル)



REBCOテープ線材長手方向

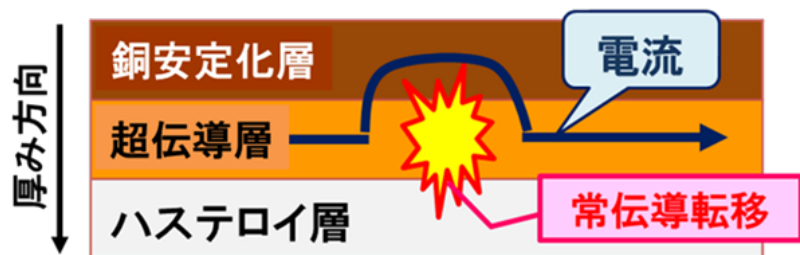


REBCOテープ線材長手方向



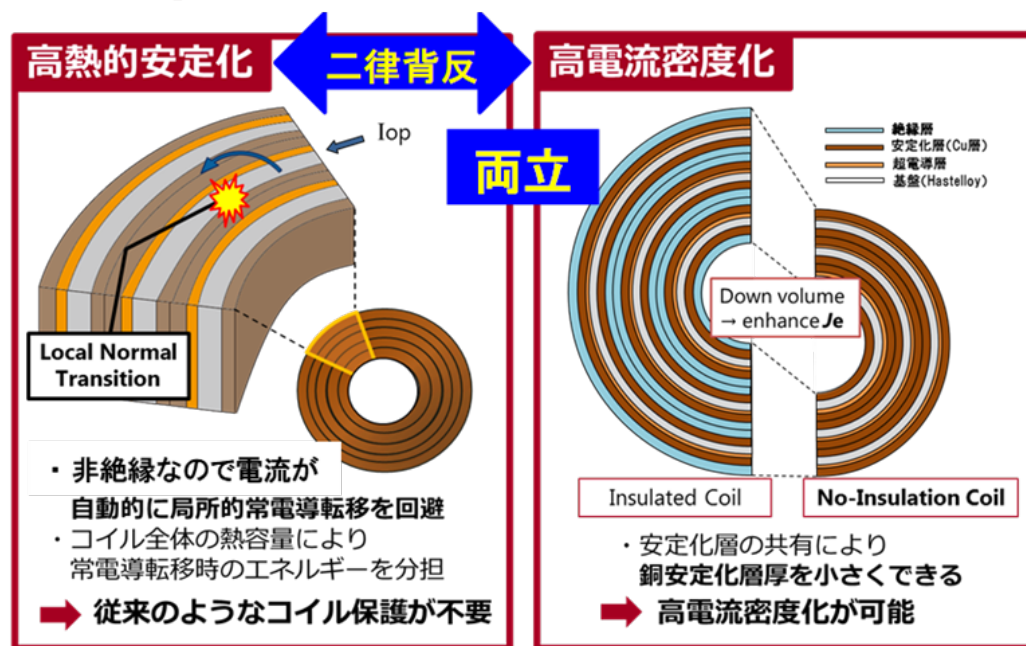
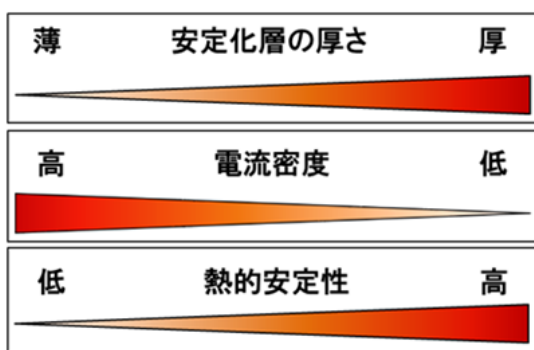
高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術(無絶縁コイル)

電気絶縁層無し



二律背反

REBCOテープ線材長手方向



T.Wang, A.Ishiyama et al., IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.25, No.3, 2015, 4603409

3つの課題:
高安定・無保護・低コスト

3つの課題
への対応

「無絶縁コイル巻線技術」の活用

- ・高電流密度化と高熱的安定化の両立
- ・劣化・焼損の回避と継続運転の実現
- ・保護を必要としないコイルの実現
- ・線材欠陥・劣化を許容するコイルの実現

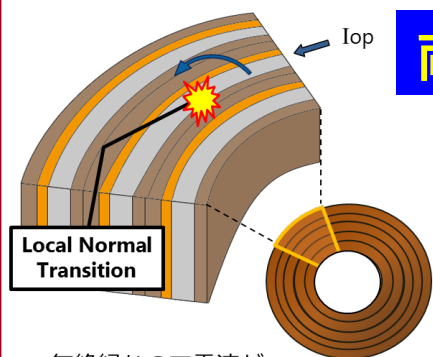
REBCO線材
の特性の活用

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

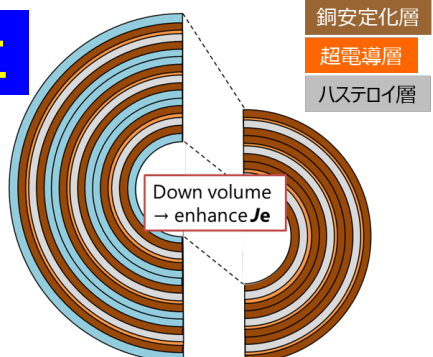


両立

- ・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

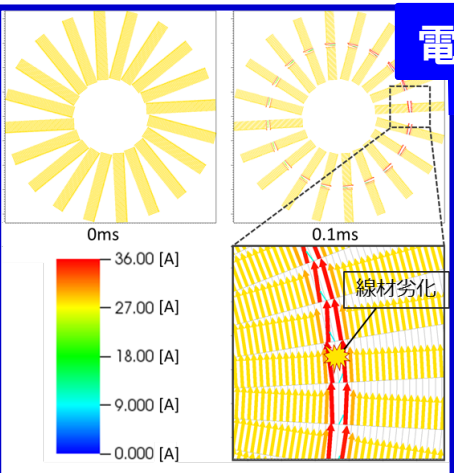
➡ 従来のようなコイル保護が不要

高電流密度化

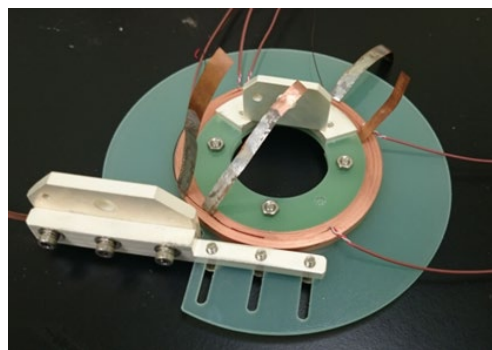


Insulated Coil No-Insulation Coil

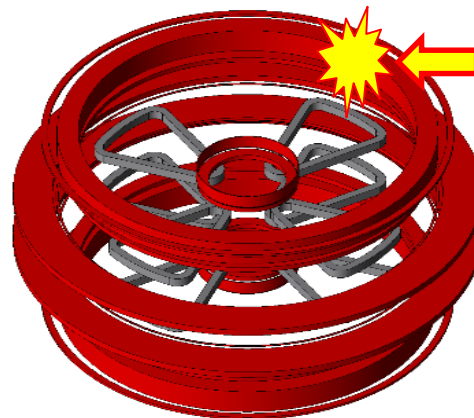
- ・安定化層の共有により銅安定化層厚を小さくできる
- ➡ 高電流密度化が可能



電流・温度分布連成過渡解析



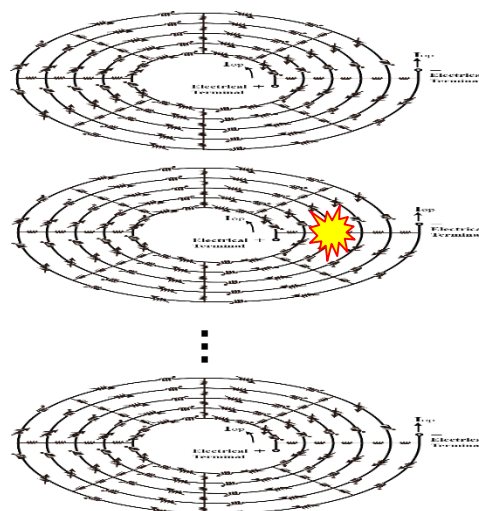
本研究 HTS-SCへの無絶縁コイル技術の適用



マルチコイルシステム内で局所的常電導転移が起こると、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。

部分要素等価回路



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

電流・温度分布連成過渡解析

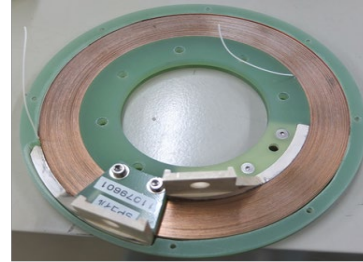
科研費(基盤研究): HTS-SC用REBCOコイルシステムの開発

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

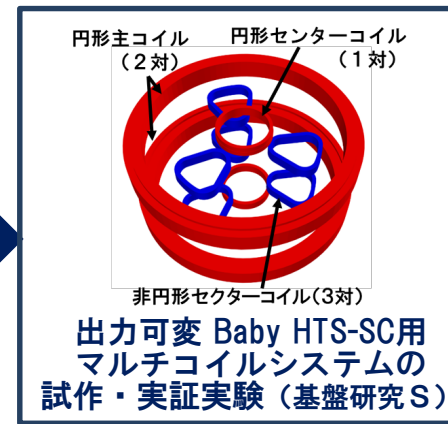
二律背反

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

1/2スケール小型実証用コイル

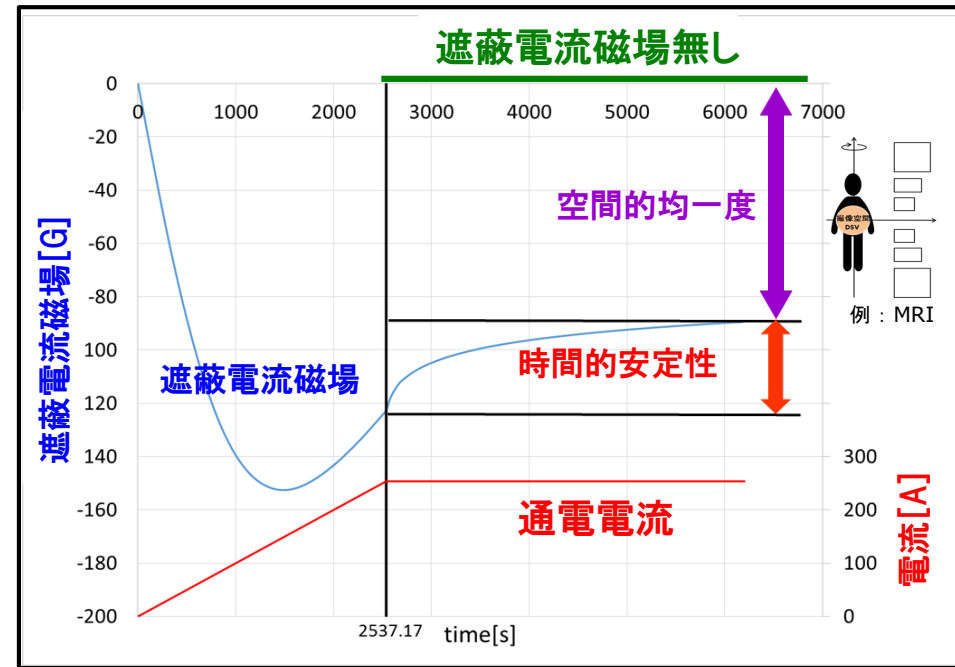
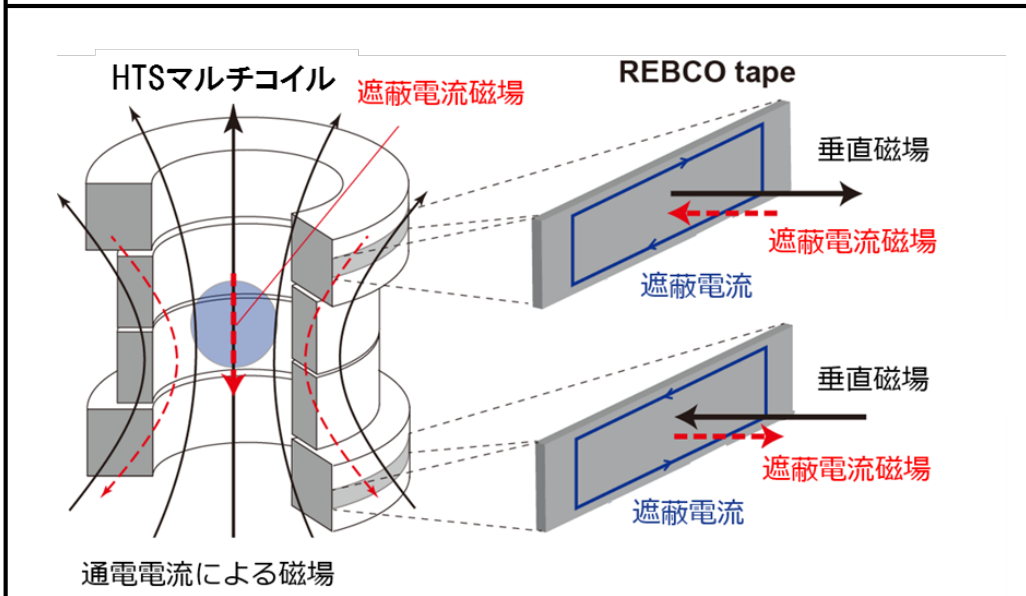
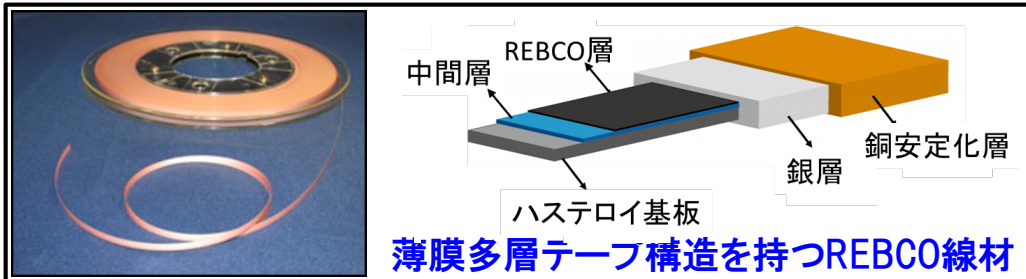


HTS-SC用REBCOマルチコイルシステムの設計原理・開発基盤の確立

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の変化によって長時定数の遮蔽電流が誘導

⇒不整磁場(遮蔽電流磁場)を発生



⇒発生磁場の時間的変動や、空間的均一度を乱す要因となっている。

出力可変(多機能化)とするための重要課題

高精度の磁場を発生する技術(遮蔽電流磁場の詳細解析)

支配方程式

三次元非線形過渡電磁場(渦電流)解析

$$\{\nabla \times \rho(\nabla T \times \mathbf{n})\} \cdot \mathbf{n} + \frac{\mu_0 d}{4\pi} \frac{\partial}{\partial x} \int_S \frac{(\nabla T' \times \mathbf{n}') \times \mathbf{R}}{R^3} \cdot \mathbf{n} dS = -\frac{\partial \mathbf{B}_0}{\partial t} \cdot \mathbf{n}$$

有限要素法(FEM)

積分方程式

超電導特性(電流-電圧特性)を考慮

- ・n値モデルを採用
- ・線材内に発生している電界: $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{V/m}$

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c(B, \theta, T)} \right)^{n(B, \theta, T)}$$



$$\rho = \frac{E_c}{J_c(B, \theta, T)} \left(\frac{J}{J_c(B, \theta, T)} \right)^{n(B, \theta, T) - 1}$$

- ◆精度は良い
- ◆非対称密行列
- ◆メモリ容量 大
- ◆計算時間 長



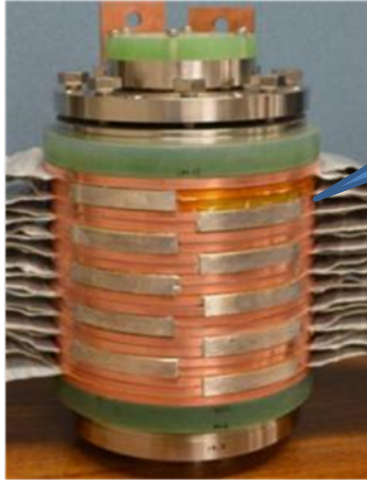
高速多重極法(FMM)+反復法

- ◆積分を高速に評価
- ◆メモリ容量を節約

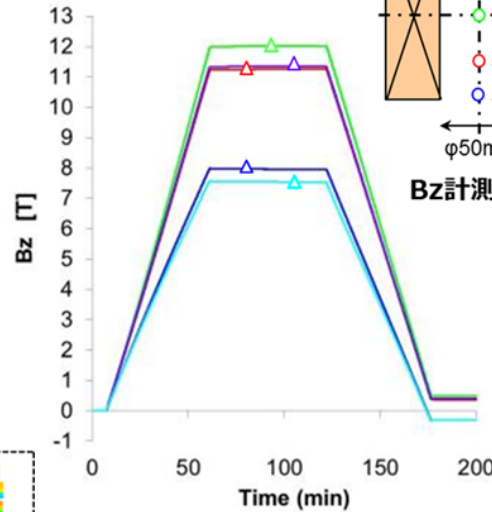
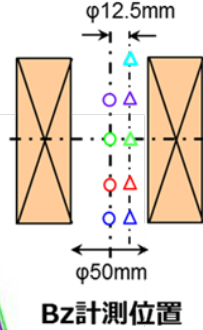
- ・ H. Ueda, A.Ishiyama et al., "Spatial and temporal behavior of magnetic field distribution due to shielding current in HTS coil for cyclotron application," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no. 3, 4100805, Jun. 2013.
- ・ H. Ueda, A.Ishiyama, et al., "Measurement and simulation of magnetic field generated by screening currents in HTS coil" IEEE Trans. Appl. Supercond., vol24, 4701505, 2014.

高精度の磁場を発生する技術(遮蔽電流磁場の詳細解析)

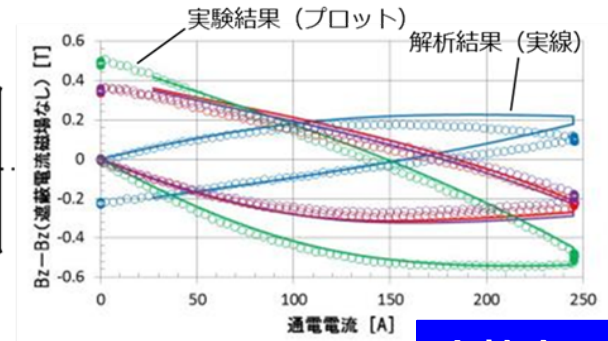
AMEDプロジェクトにて試作実験



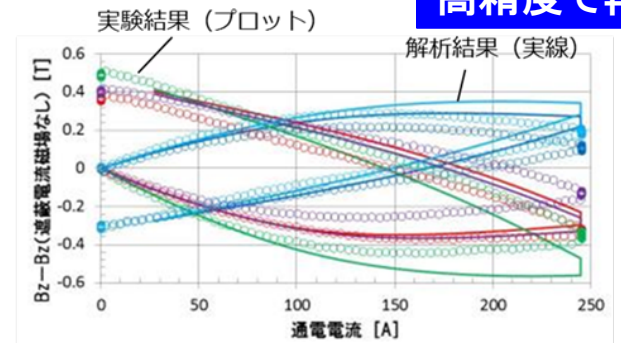
内径: 50mm
10T REBCO コイル



励磁パターン
(中心磁場12T、運転温度10K)

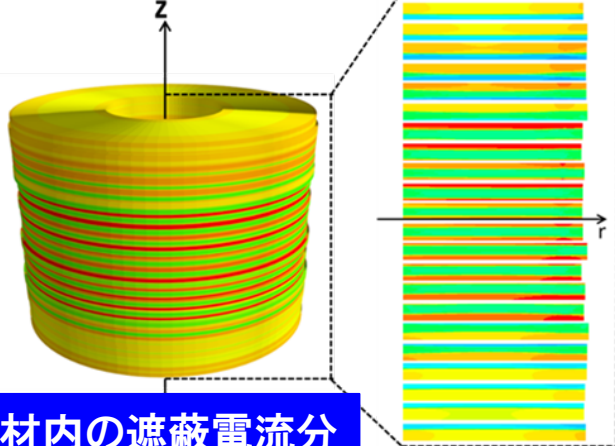


高精度で再現



遮蔽電流磁場の実験結果と解析結果比較

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

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

電流制御法(Demagnetization)	細線化
<p>通電電流をダンプさせ、遮蔽電流を低減させる手法</p>	<p>レーザー等で線材にスリットを入れ、遮蔽電流を低減させる手法</p>
<p>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.</p>	

時間安定性の改善

空間分布精度の改善

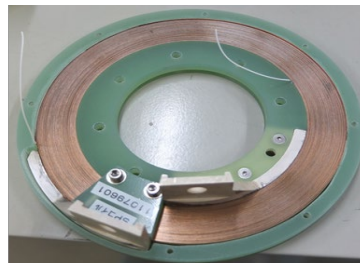
科研費(基盤研究): HTS-SC用REBCOコイルシステムの開発

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

二律背反

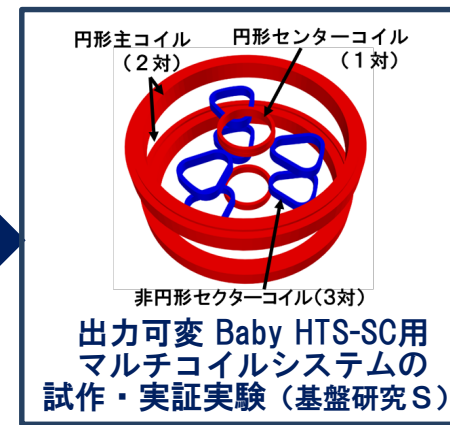
H 高熱的安定化

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

1/2スケール小型実証用コイル



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

(NEDOプロジェクト:1.7GPa以上を達成。特許出願・第60回電気科学技術奨励賞受賞)

軸方向圧縮力 磁場

電流 フープ力

径方向膨張力 軸方向圧縮力 径方向膨張力

含浸不要

上下側板

巻線 外枠

応力分担

ローレンツ力

フープ応力 $F_L = B \times J \times R$

大口径コイルで高磁場・高電流密度を達成するには、大きなフープ応力に耐え得る機械的強度が不可欠。

コイルを構成する枠材・側板による応力分担で高機械強度化を実現 (2GPa以上の強度達成)

Y-based Oxide superconductor and Reinforcing Outer Integrated Coil

* S. Nagaya, A. Ishiyama et al", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 23, NO. 3, June (2013), 4601204.

劣化発生・拡大の抑制

「YOROIコイル補強構造」の活用

- ・機械的擾乱による超伝導特性劣化の抑制
- ・電磁力によるコイル変形に起因する劣化拡大の抑制
- ・高磁場・高電流密度化と小型化の実現
- ・使用線材量の削減

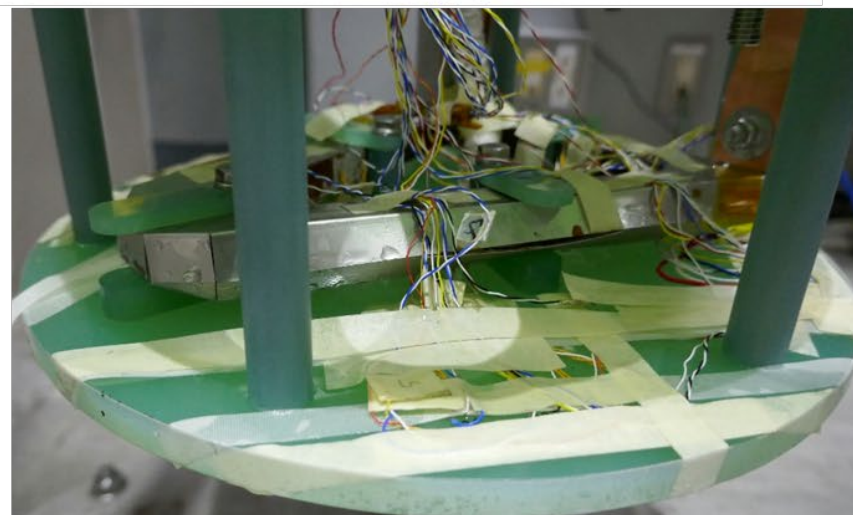
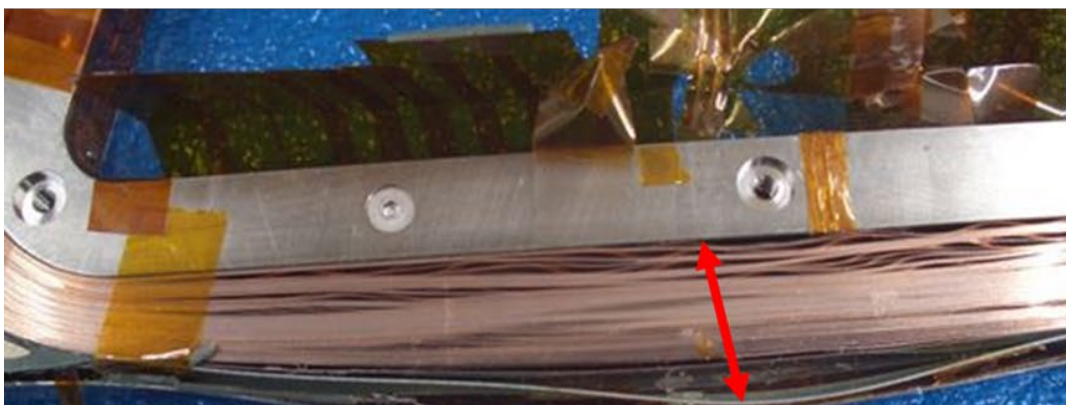
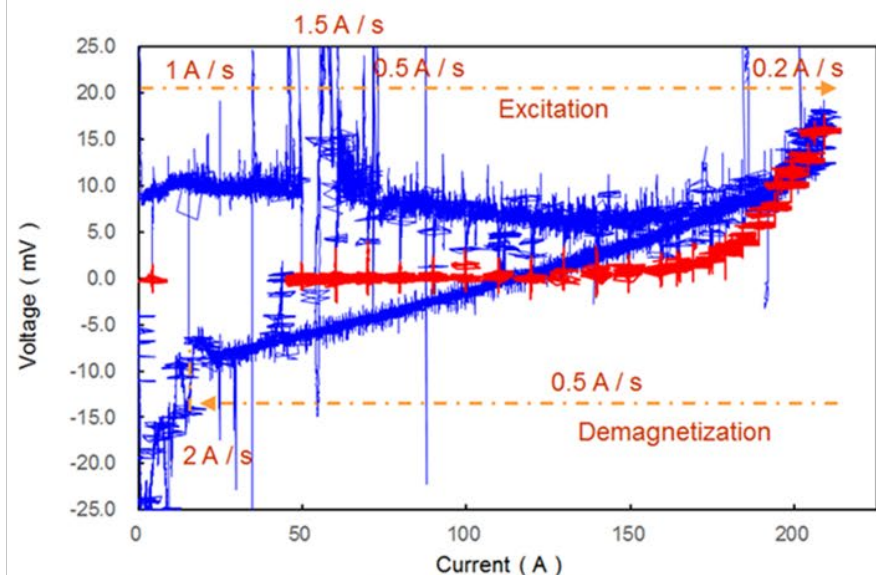
低コスト化

YOROIKOIL補強:無絶縁非円形REBCOコイルの機械強度試験

REBCO非円形セクターコイル(補強無し)の機械強度試験@NIMS



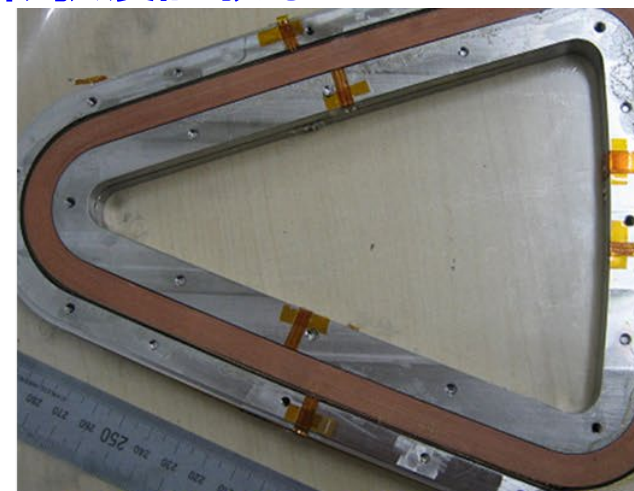
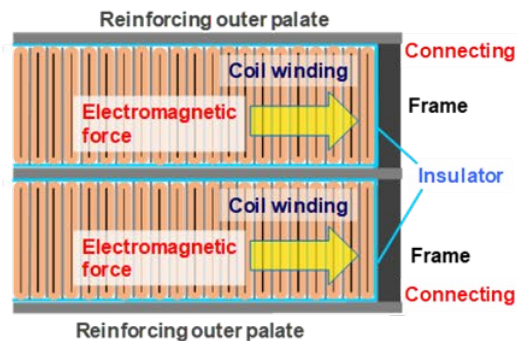
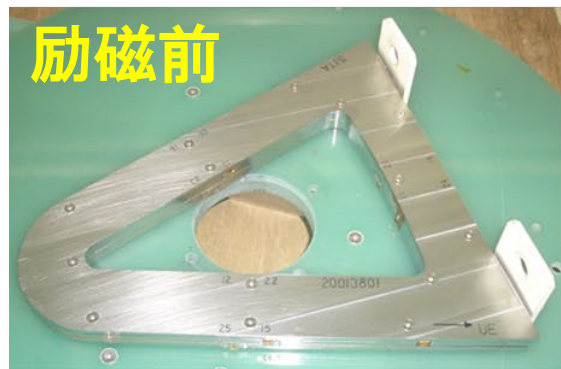
補強無し (210A@10.4T)



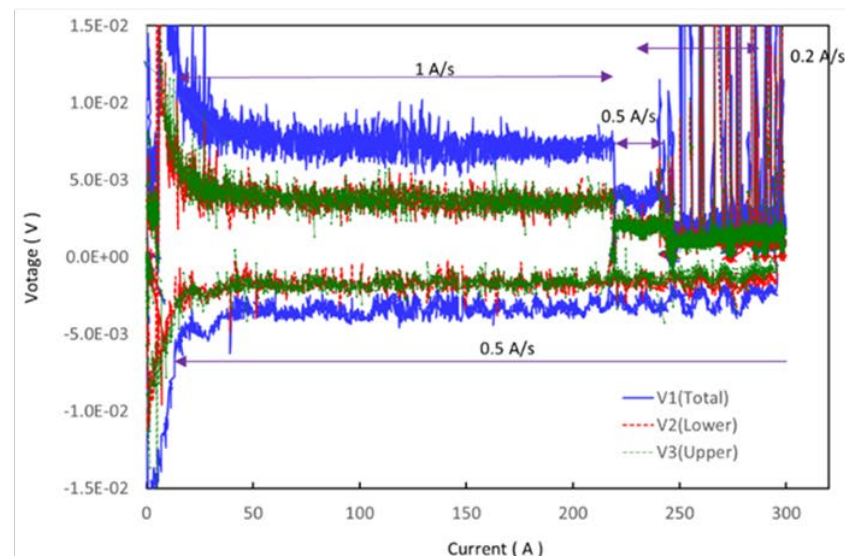
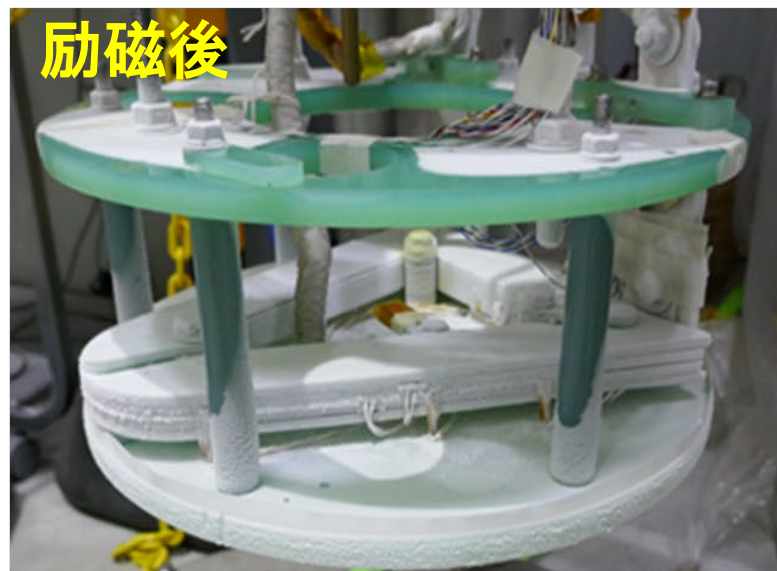
T.Watanabe, A.Ishiyama et al., "Mechanical Strength Evaluation of a Yoroi-Coil Structured Non-Circular REBCO Pancake Coil in High Magnetic Field" IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 32, 6, 2022, 4600605

YOROIコイル補強：無絶縁非円形REBCOコイルの機械強度試験

REBCO非円形セクターコイル(YOROIコイル補強)の機械強度試験@NIMS



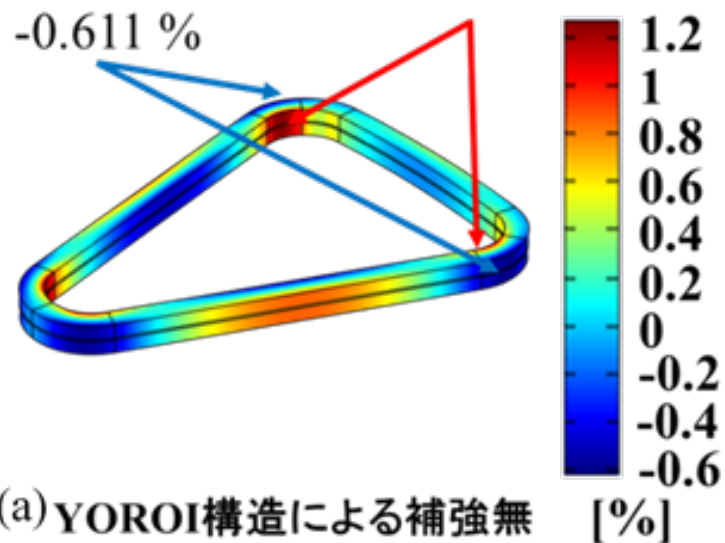
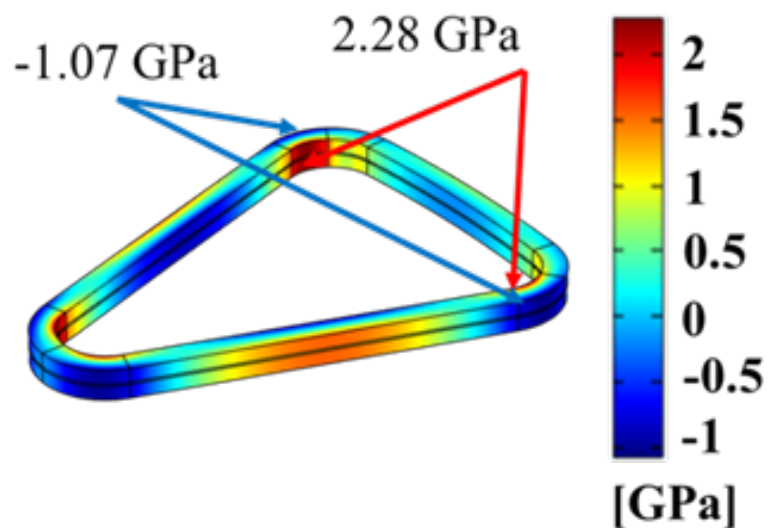
YOROI補強 (300A@14T)



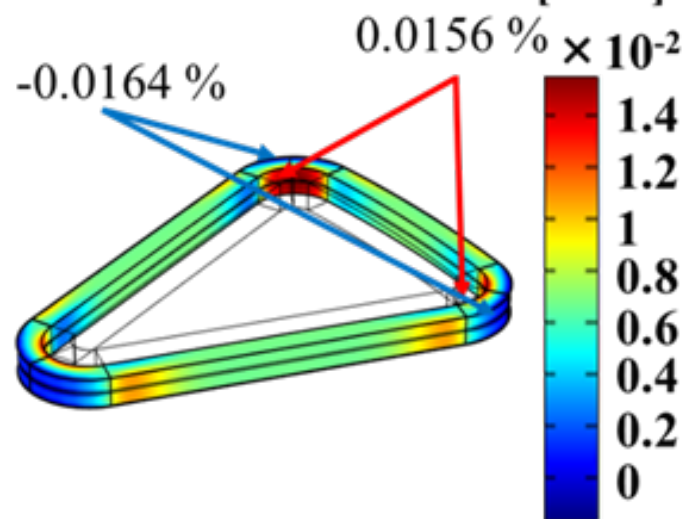
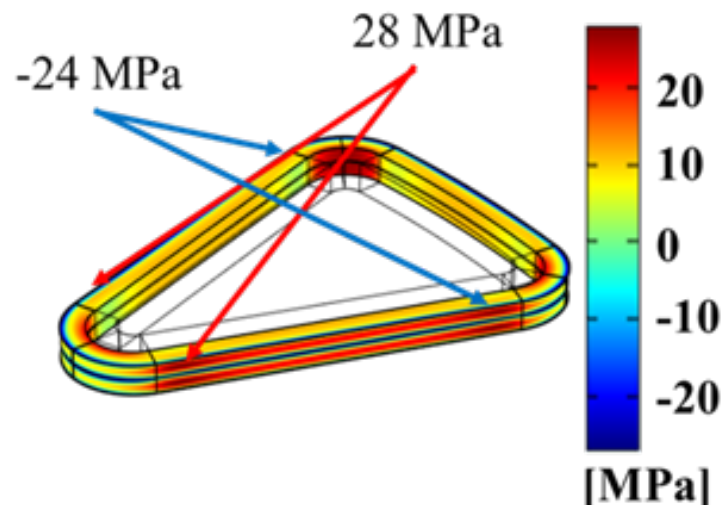
T.Watanabe, A.Ishiyama et al., "Mechanical Strength Evaluation of a Yoroï-Coil Structured Non-Circular REBCO Pancake Coil in High Magnetic Field" IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 32, 6, 2022, 4600605

YOROIコイル補強：無絶縁非円形REBCOコイルの機械強度試験

応力・ひずみ解析結果(10T/150A)



(a) YOROI構造による補強無



(b) YOROI構造による補強有

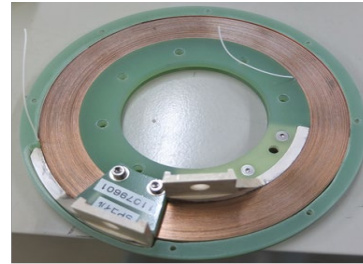
科研費(基盤研究): HTS-SC用REBCOコイルシステムの開発

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

二律背反

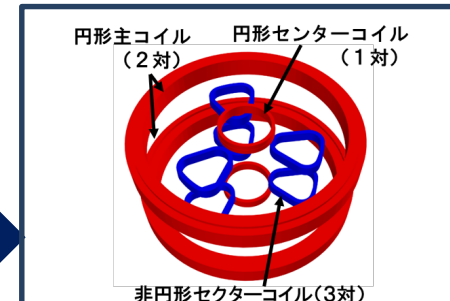
H 高熱的安定化

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

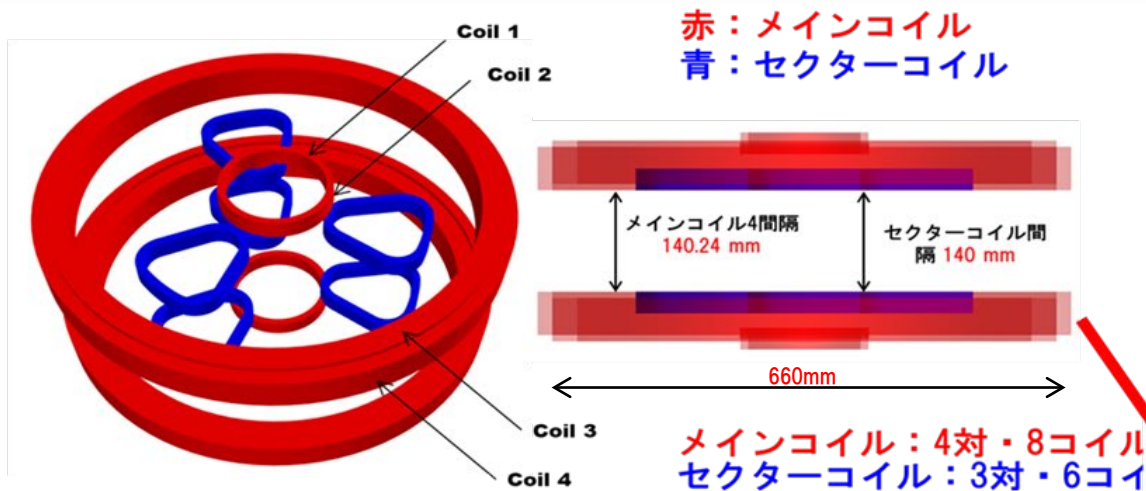
1/2スケール小型実証用コイル



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

UBSC(1/2スケール)用REBCOコイルシステムの試作・実験



加速粒子：陽子, 引出し半径：20cm

Energy (MeV)	I_{op} (A)
5	540
4	483
2.5	382

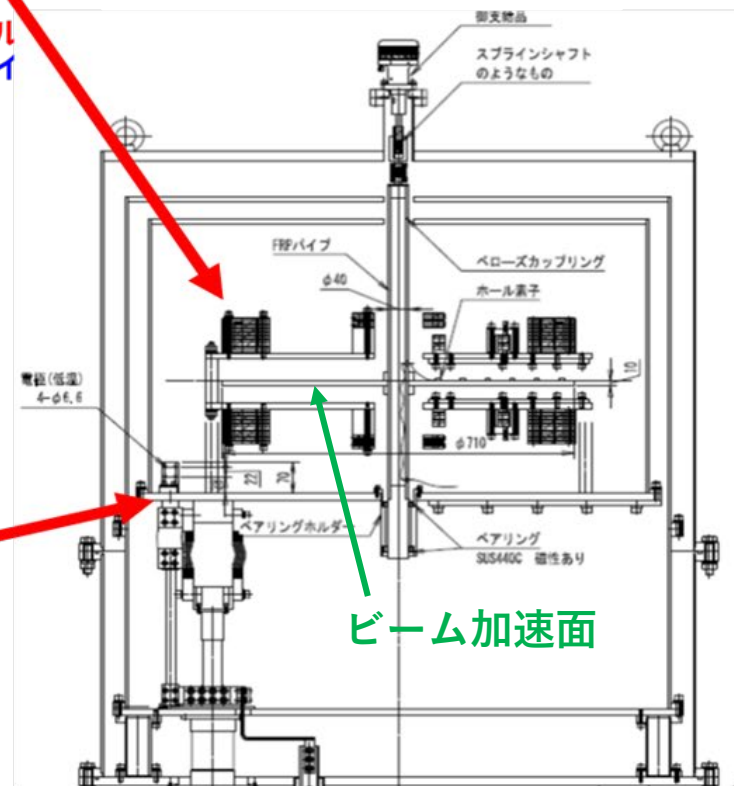
◆目的関数：コイル体積(使用線材量)⇒最小化

◆設計変数：コイル形状、コイル位置

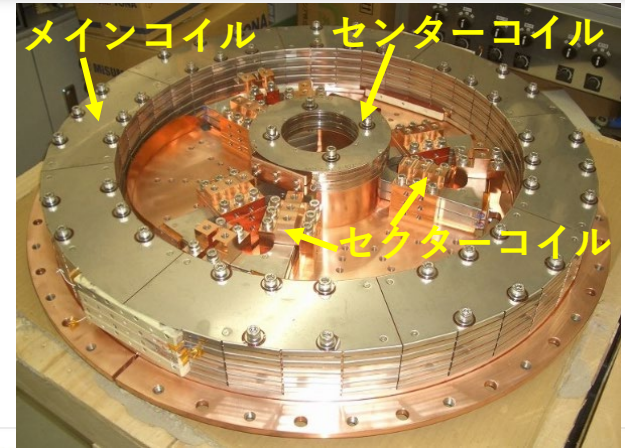
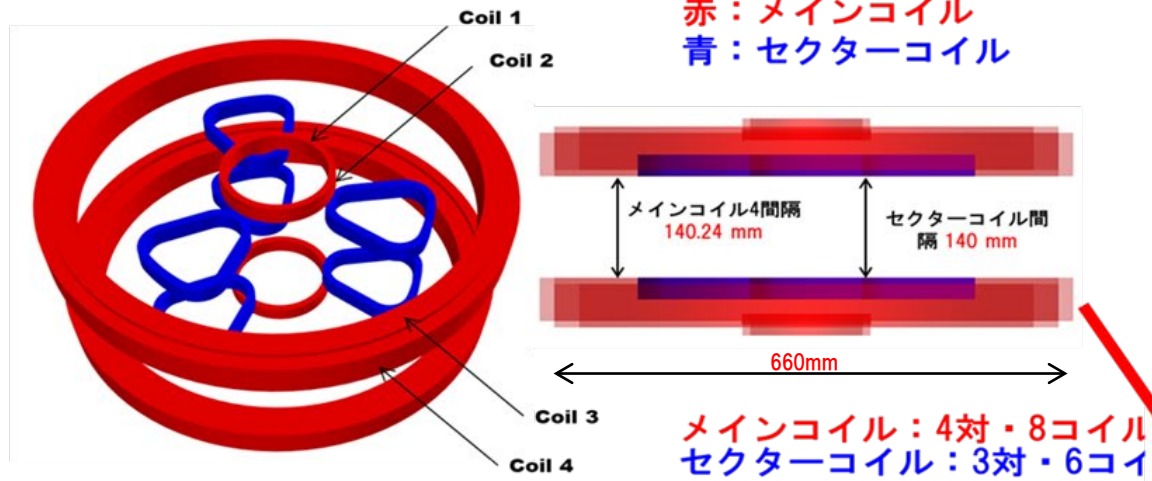
◆制約条件：

- ・ビーム軌道面の磁場分布
⇒回転方向平均値と理想磁場の誤差<5%
- ・超電導特性(J_c - B - θ 特性)
- ・電磁応力<1GPa
- ・通電電流：540A (全て同一電源)
- ・コイル数 (都度設定)

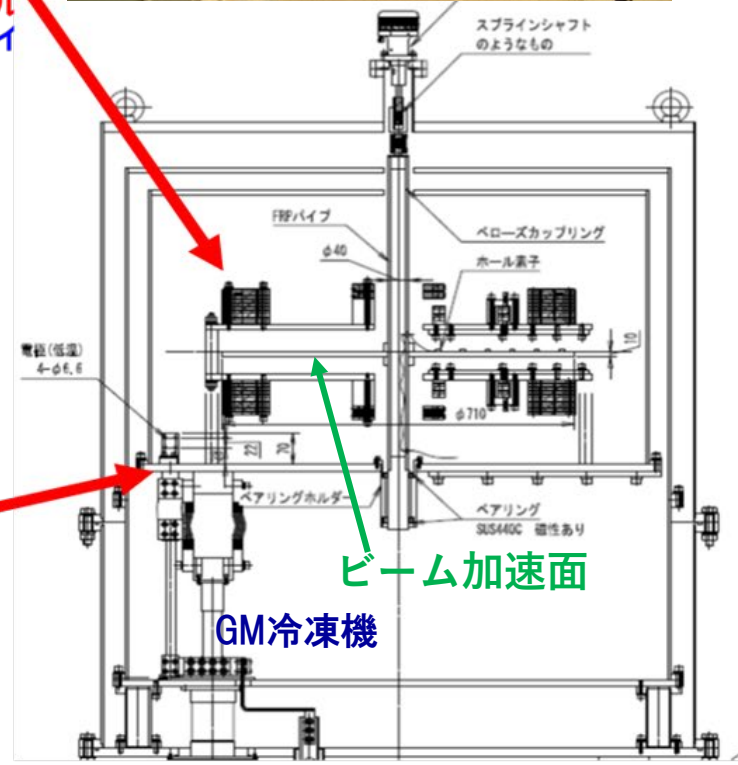
◆最適化手法：Simulated annealing algorithm



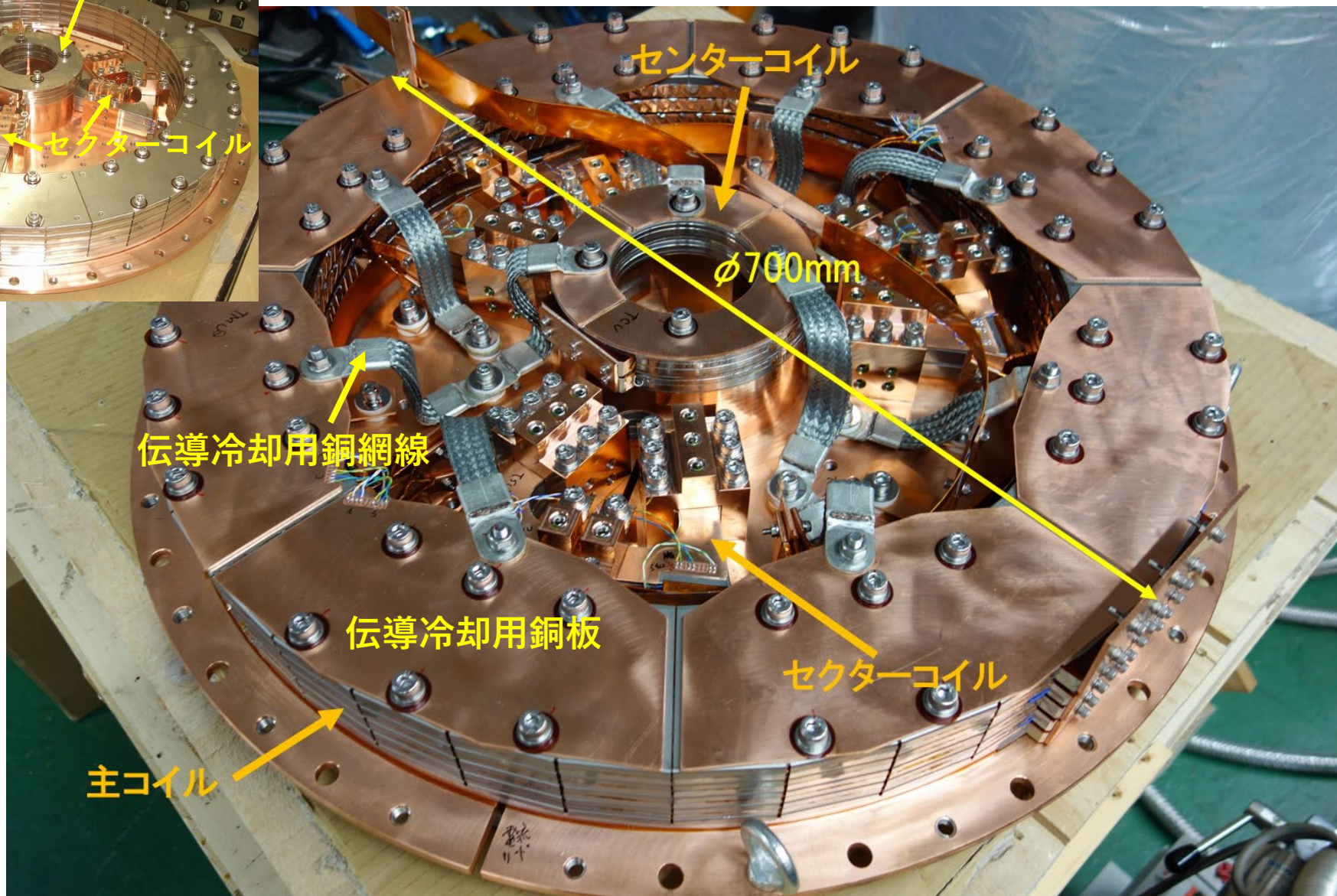
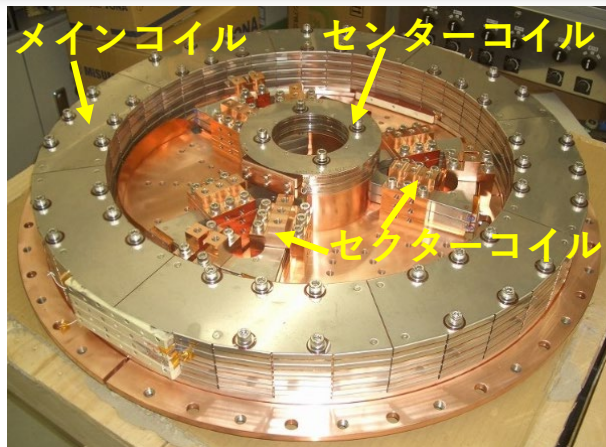
UBSC(1/2スケール)用REBCOコイルシステムの試作・実験



実験用真空断熱容器

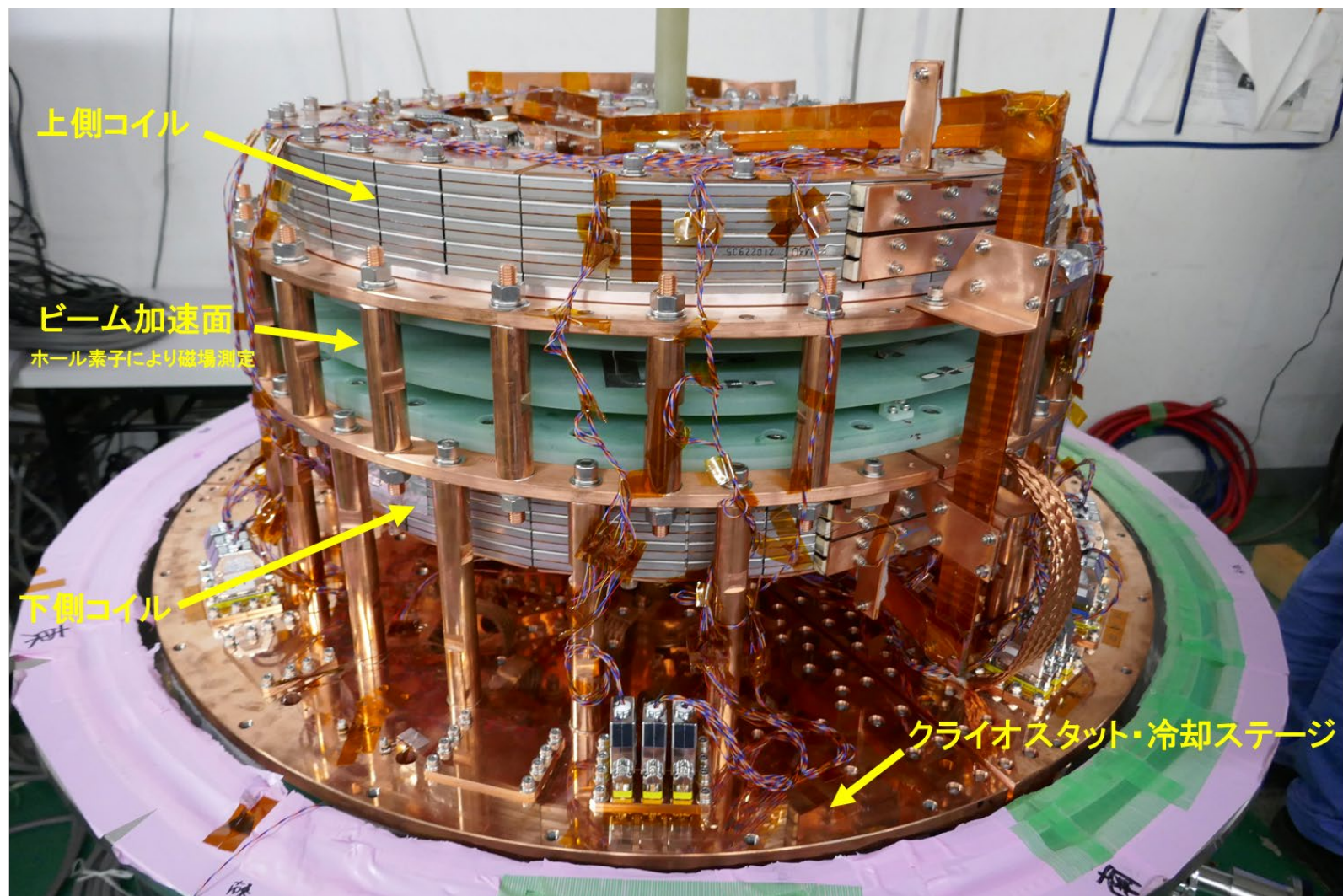


UBSC(1/2スケール)用REBCOコイルシステムの試作・実験

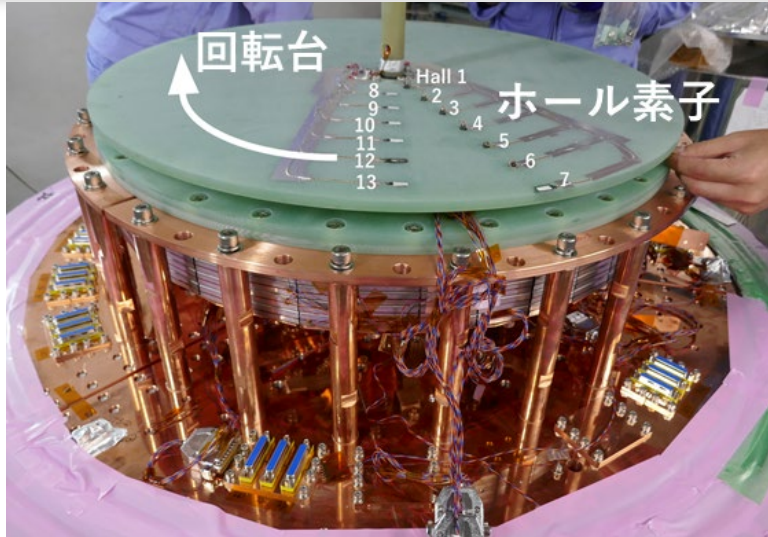


UBSC(1/2スケール)用REBCOコイルシステムの試作・実験

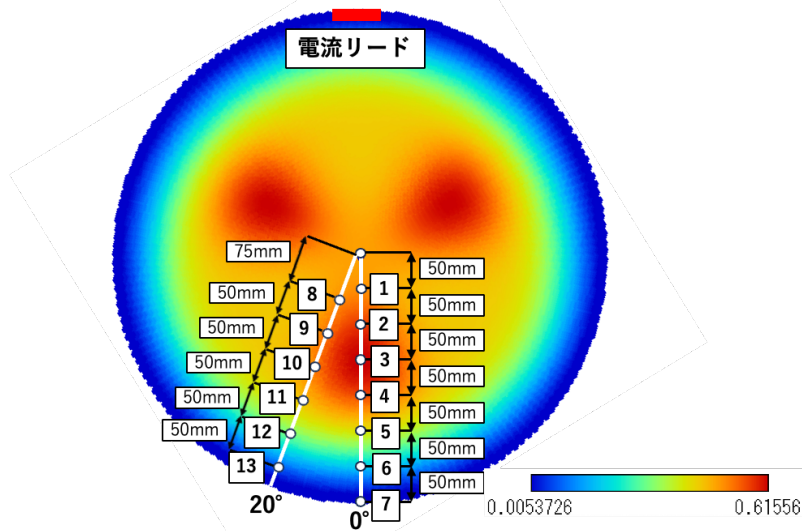
- ・温度計: 34か所
- ・ホール素子: 18か所
- ・両端電圧: 26か所
- ・ひずみ計: 80か所



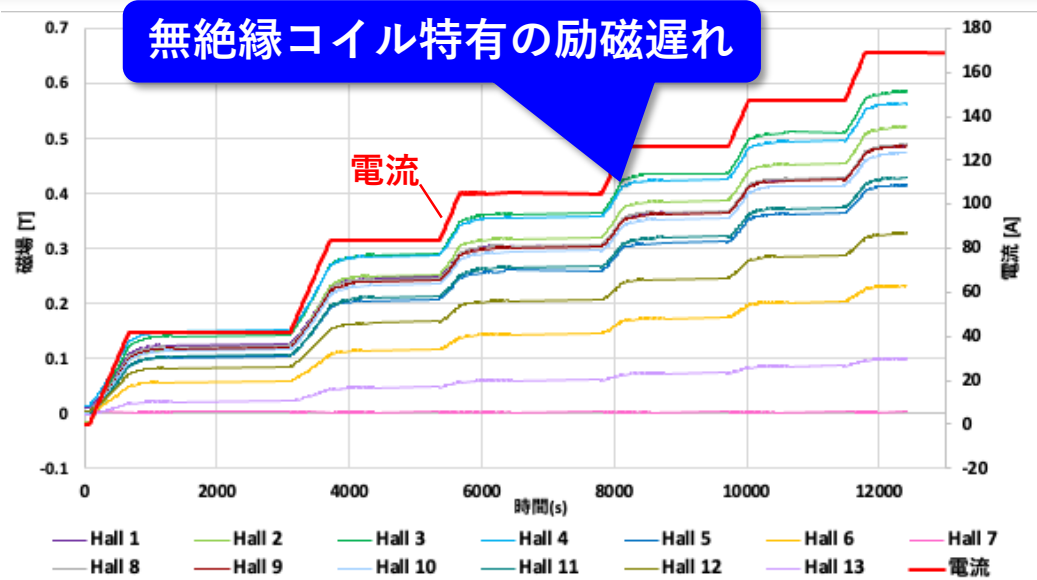
実験結果の一例：ビーム加速面上の発生磁場評価



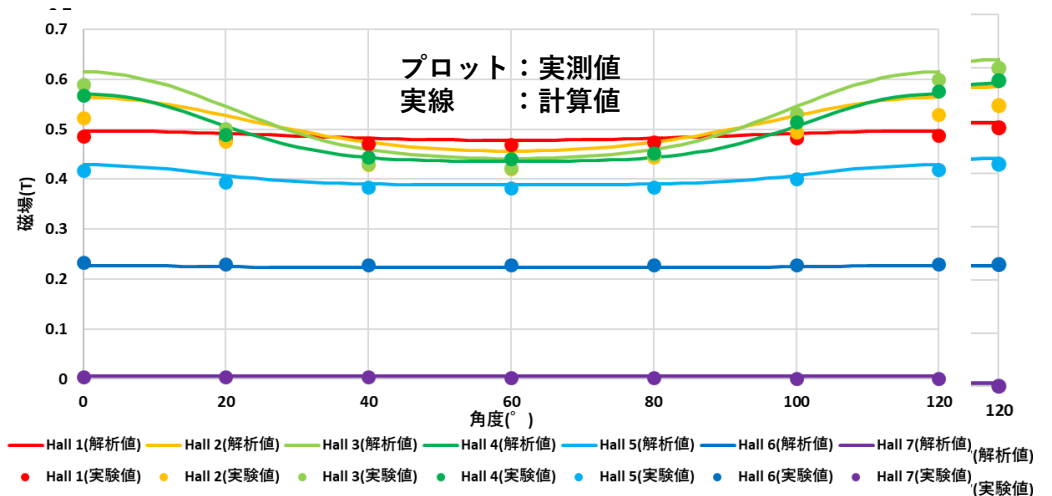
回転台上のホール素子の位置



加速面の磁場分布 (計算値)



励磁中の加速面(回転台)磁場の変化 (実測値)



励磁完了後の加速面 (回転台) の磁場分布

「高温超伝導スケルトン・サイクロトロン」の実用化に向けて

これまでの関連研究活動(科研費)

★基盤研究B(2008~2010年)

課題名:「普及型重粒子癌治療装置用超伝導コイルシステム開発のための基礎的研究」

REBCO線材の耐放射線性評価試験(超伝導特性と機械特性への影響評価)、中性子線照射後のRI生成物評価試験を実施。また炭素線がん治療用サイクロトロンのための超伝導コイルシステムの設計を試み、小型化の可能性を示した。

★基盤研究A(2011~2013年)

課題名:「次世代重粒子線がん治療用超伝導加速器の基盤技術開発」

空芯高温超伝導コイルのみから成るサイクロトロン(HTS-SCの発案)の提案。高精度磁場発生のための方策の検討。

★基盤研究A(2014~2017年)

課題名:「次世代医療用サイクロトロン開発のための5H超伝導コイルシステムの基盤技術の確立」

5-High「高機械強度・高電流密度・高安定・高磁場・高精度磁場」の実現を目的とする基盤技術の確立。

H.Ueda, M.Fukuda, A.Ishiyama et al., "Conceptual Design of Next Generation HTS Cyclotron", IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol.23, No.3, 4100205, 2013

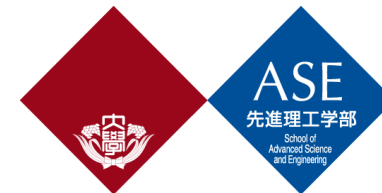
科研費基盤研究S (2018年~2022年度)

- ・5-High統合・革新的コイル化技術の開発
- ・ α 線核医学治療(内用療法)の普及拡大の鍵となる α 線放出RI(^{211}At)の多量・安定・分散生産を可能とする世界初の超小型・高強度・エネルギー可変のHTS-SC用コイルシステムの設計原理・開発基盤の確立

集大成

実用化

- ★基盤研究B(2022~2024年)
「保護の不要な高ロバスト・高性能・低コスト高温超伝導コイルシステムの実現」



ご清聴ありがとうございました

