

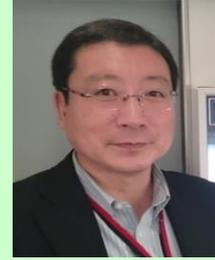
次世代医療用高温超伝導スケルトン・サイクロトロン  
の設計原理・開発基盤の確立

Establishment of design principle and basic technology  
for next generation medical high temperature  
superconducting skeleton-cyclotron

課題番号：18H05244

石山 敦士（ISHIYAMA, ATSUSHI）

早稲田大学・理工学術院・教授



研究の概要

進行がんへの効果が期待される「α線核医学治療法」の普及に不可欠なα線放出RIの多量・分散生産のための超小型・高強度・エネルギー可変の次世代加速器の開発を最終目標とする。本研究では次世代加速器の設計原理・開発基盤の確立を目指し、ビーム加速のための高精度磁場を形成する高温超伝導空芯マルチコイルシステムを実現する革新的コイル化技術を開発する。

研究分野：電気電子工学

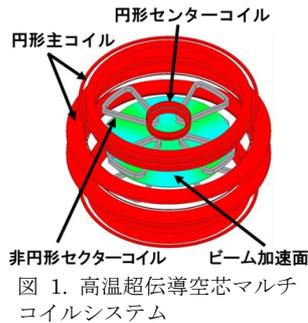
キーワード：電気機器工学、超伝導材料、加速器、量子ビーム、癌

1. 研究開始当初の背景

本研究で対象とするα線RI ( $^{211}\text{At}$ )は、半減期が短いため、その生産拠点を病院の近く、或いは病院内に設置する必要がある。従ってα線核医学治療法の適用拡大の鍵を握るのが、 $^{211}\text{At}$ を安定的に製造・供給でき、大規模な建物・施設を必要としない超小型・高強度出力の加速器であり、その実現の起点となり得るのが本研究の目標である「高温超伝導コイルシステムを適用したスケルトン・サイクロトロン（HTS-SC）」ということになる。

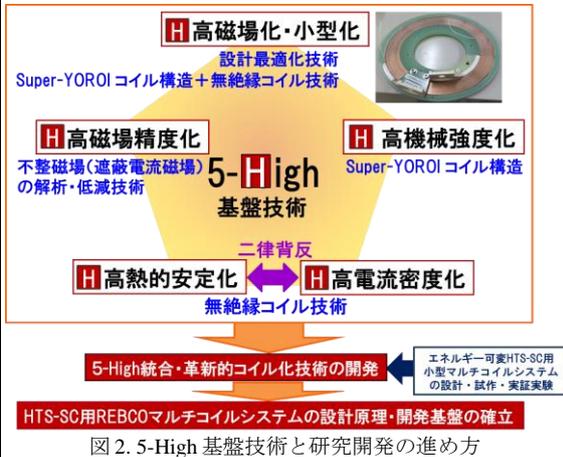
2. 研究の目的

開発目標とするHTS-SC用マルチコイルシステムには、複数の空芯超伝導コイルによりビーム加速に必要な磁場を形成するという特徴がある（図1）。これによりエネルギー可変とすることができ、α線RIに加え、PET用RI製造など1台で多目的使用が可能となる。このような超伝導コイルを実現するには、高度の機械・構造設計、熱設計、電気設計に加え、高精度で時間安定度の高い磁場を形成する技術の確立が必須となる。本研究ではその根幹となる「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」を同時に実現する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。



3. 研究の方法

本研究では現状最も優れた特性（高温・高磁場で高い臨界電流特性）を持つREBCO（RE:希土類元素）超伝導多層薄膜テープ線材の適用を前提とする。そして図2に示すように、5-High基盤技術を、「Super-YOROIコイル構造」、「無絶縁コイル技術」、「不整磁場（遮蔽電流磁場）低減技術」、「マルチコイル設計最適化技術」をキーテクノロジーとしてこれらを統合した革新的コイル化技術を開発し、最終的にエネルギー可変小型マルチ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。5-Highの各基盤技術の活用法と有効性を検討・検証するために、試作モデルコイルによる評価実験と共に、電磁界・熱・機械特性評価のための数値解析用プログラムを開発し、実験と解析の両面から研究開発を進めている。



#### 4. これまでの成果

1) 高機械強度化技術：「Super-YOROI コイル構造」適用時のコイル変形や磁場精度への影響低減効果を HTS-SC 検証用小型マルチコイルシステムを対象として数値解析に基づき評価した。コイル変形の影響が大きい非円形セクターコイルの結果を図 3 に示す。ひずみ・変形が抑えられていることがわかる。

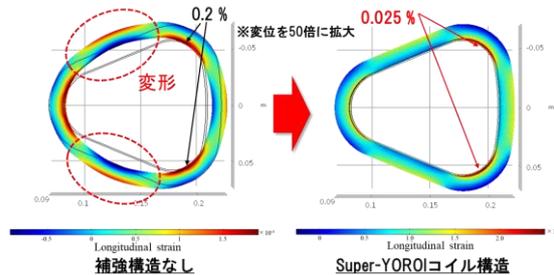


図 3. 非円形セクターコイルのひずみ・変形解析結果

2) 高電流密度化と高熱的安定化を両立する技術：複数のマルチコイルシステムに無絶縁コイル技術を適用したときの電磁的・熱的過渡特性を、試作モデル小コイルを用いた実験と数値解析に基づき評価した。解析結果は実験結果とよく一致し、無絶縁コイル内の複雑な電磁的・熱的振舞いを把握することができるようになった。その他、無絶縁コイルの熱的過渡安定性に対するコイルサイズ、運転温度、印加磁場の影響、層間の接触電気抵抗の適正值決定法とそれを実現する方法の提案とその有効性の検証実験、無絶縁コイルが常伝導転移した時の保護法の提案等を行った。

3) 高精度の磁場を発生する技術（遮蔽電流磁場の低減）：研究代表者らが開発した三次元非線形過渡電磁界解析プログラムを用いて、円形小コイルを対象に遮蔽電流磁場の影響低減法（細線化法と電流制御法）の効果の評価を行うとともに、HTS-SC 検証用小型マルチコイルシステムを対象として主コイルとセクターコイルの励磁順の影響や電流波形制御（オーバーシュート法等）の効果、すなわち、必要とする発生磁場の空間的精度と時間安定度の実現性について検討した。

4) 5-High 統合・革新的コイル化技術の展開：無絶縁コイル技術と、遮蔽電流による不整磁場低減技術の 2 つを統合したときに生じる課題として、本研究の目的の 1 つであるエネルギー変化（発生磁場の変化）時の挙動（コイル内の複雑な電磁現象）を評価するための解析プログラムを開発した。また REBCO コイルの高磁場応用時に課題となる遮蔽電流に起因する電磁応力・ひずみ解析を行い、その影響評価ができるようになった。

5) HTS-SC 検証用小型マルチコイルシステムの設計：5-High 基盤技術とその統合技術の開発成果を取り入れながら 2021 年度に試作、2022 年度に実験を予定している小型マルチコイルシステムの設計を繰り返し行ってきた。

#### 5. 今後の計画

5-High 基盤技術について継続して研究開発を進めていくとともに、これらを統合した革新的コイル化技術の確立に向けた検討を行っていく。例えば、無絶縁マルチコイルシステムを構成する 1 要素コイル内での常伝導転移発生時及びコイル保護動作時のコイル間の電磁的・機械的相互作用（電磁力バランスの変化の影響）や Super-YOROI 補強構造と無絶縁コイル巻線技術を適用したときの遮蔽電流による不均一な電磁応力の影響予測とその対応策等について検討を進めていく。また、最終年度の HTS-SC 検証用小型無絶縁マルチコイルシステムによる実験において 1) ひずみ計によるコイル変形とその磁場分布への影響評価、2) 発生電圧や磁場、温度分布測定等による熱的安定性評価、3) 加速器として必要となるビーム加速面における磁場の空間分布と時間安定度の測定評価を実施し、HTS-SC の成立性・有効性を実証する。

#### 6. これまでの発表論文等（受賞等も含む） <論文>

- 1) H.Onoshita, Y.Yoshihara, H.Ueda, S.Noguchi, A.Ishiyama, “Influence of coil size and operating temperature on the transient stability of a multi-stacked no-insulation REBCO pancake coil system”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 30, to be published (2020)
- 2) T.Ichikawa, Y.Kakimoto, H.Onoshita, T.Kinpara, S.Noguchi, S.Nagaya, T.Watanabe, A.Ishiyama, “Experiments on the Effects of Local Normal Transitions in Multi-Stacked No-Insulation REBCO Pancake Coils” IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 29, No. 5, 4601404, (2019)
- 3) Y.Kakimoto, T.Ichikawa, H.Onoshita, T.Kinpara, A.Ishiyama, S.Noguchi, “Evaluation of Electromagnetic Behavior of No-Insulation REBCO Pancake Coil With Multiple Defects” IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 29, No. 5, 4603005, (2019)
- 4) H.Ueda, A.Ishiyama, S.Noguchi, T.Watanabe, S. Nagaya, J. Yoshida, M. Fukuda, “Conceptual Design of Compact HTS Cyclotron for RI Production,” IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 29, No. 5, 4101105, (2019)

#### <受賞>

- ・公益財団法人低温工学・超電導学会：2020 年度業績賞「学術賞」受賞

#### 7. ホームページ等

<http://www.eb.waseda.ac.jp/ishiyama/>