

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 18 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630116

研究課題名(和文)核廃棄物処理のための大出力サイクロトロン用超伝導コイルシステムの設計研究

研究課題名(英文)Design study on superconducting coil system of cyclotron for nuclear waste disposal

研究代表者

石山 敦士 (Ishiyama, Atsushi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00130865

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の最終目標は、高レベル放射性廃棄物の処理を可能とする「30MW級超伝導陽子加速器の開発」である。本提案課題では、REBCO高温超伝導線材と、筆者らが多くの実績を積み重ねてきた超伝導コイル化技術を活用することを前提に、筆者らが先行研究で提案した新しいサイクロトロン方式を採用した30MW級超伝導陽子加速器の主要素である超伝導コイルシステムの実規模設計を試みた。そしてその結果に基づき、現状技術の到達点評価を行うとともに、さらなる開発の必要性の高い高機械強度化に焦点を絞り、数値構造解析に基づき、2GPa以上の励磁時のフープ応力に耐え得る構造について検討を行った。

研究成果の概要(英文)：We have been developing superconducting REBCO coil systems for a cyclotron with a output power of 30MW for nuclear waste disposal. At first, we carried out conceptual design of the REBCO coil system for a 30MW cyclotron. The REBCO coils require a high mechanical strength in order to overcome the huge hoop stress. In our previous study, we have proposed a coil structure named "YOROI-coil structure". The YOROI-coil structure consists of the upper and lower plates and the outer frame of the winding. The outer frame is connected to the upper and lower plates, and transfers a part of electromagnetic force from the coil winding to the reinforcing outer plates. However, to realize HTS magnets with higher magnetic field and higher current density, development of advanced YOROI-coil structure is expected. In this study, we investigated effect of stress control structure to realize HTS coil with a mechanical strength over 2GPa by the three-dimensional finite element structural analyses.

研究分野：超伝導工学

キーワード：加速器 超伝導材料 電気機器 核廃棄物処理 量子ビーム

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災・福島原発事故後、原子力利用の今後について多くの議論が成されているが、現在全世界で約 400 基の原発が稼働しており、使用済み燃料の処理問題は避けては通れない極めて深刻な人類共通の課題である。その有力な対応策の一つとして「分離・変換技術」がある。分離・変換技術とは、高レベル放射性廃棄物に含まれる放射性核種をその半減期や利用目的に応じて分離する技術（分離技術）と、長寿命核種を短寿命核種あるいは非放射性核種に変換するための技術（変換技術）である。これにより、長期リスクの低減、放射性廃棄物の資源化・有効利用（例えば、Ru や Pd 等の希少元素の利用。熱源、放射線源、触媒としての利用等）が可能となる。この技術を実現する候補の一つとして「加速器駆動システム (ADS: Accelerator Driven System)」がある。ADS 用として必要となる陽子加速器の出力 (MW=エネルギー GeV×ビーム電流 mA) は数 10MW に及ぶため、現存する大型加速器の出力のさらに 1 桁以上大きな大出力・高効率の加速器の開発が必須となる。

そこで筆者らは、高温超伝導技術を活用した 30MW 級 (1GeV×30mA) の出力、30%以上の加速効率の大出力・高効率陽子加速器の開発を目指すこととした。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、高レベル放射性廃棄物の処理を可能とする「30MW 級超伝導陽子加速器の開発」である。本提案課題では、特性向上が著しいイットリウム系高温超伝導線材（以下、REBCO 線材）と、筆者らが多くの実績を積み重ねてきた超伝導コイル化技術を活用することを前提に、筆者らが先行研究で提案した新しいサイクロトロン方式を採用した 30MW 級超伝導陽子加速器の主要素である超伝導コイルシステムの実規模設計を試みる。そしてその結果に基づき、現状技術の到達点評価を行うとともに、さらなる開発の必要性の高い技術（ここでは高機械強度化）に焦点を絞り、課題解決の方策を探ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 超伝導コイルシステムの試設計

想定するサイクロトロンは筆者らが提案した「先進ハイブリッドサイクロトロン」で、図 1 のように AVF サイクロトロンとリングサイクロトロンの持つ特長を合わせ持った全く新しいサイクロトロンである（引用文献①）。そして、従来の加速器では常識であった鉄心を使用を行わずに、円形スプリットコイル（等時性磁場発生用）とスパイラルセクターコイル（ビーム集束 AVF: Azimuthally Varying Field 発生用）から成る空芯の高温超伝導コイルシステムのみで加速に必要な磁場形成を行うことが最大の特徴となってい

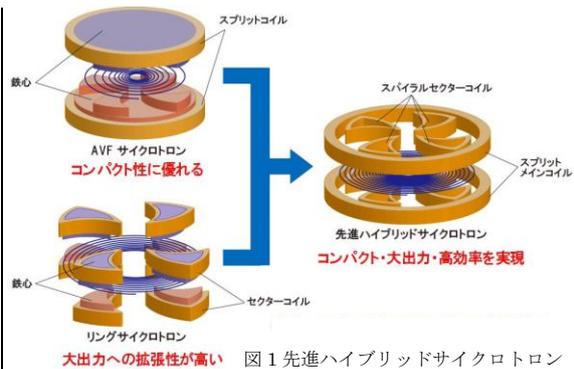


図 1 先進ハイブリッドサイクロトロン

る。まず、本研究課題の目標である出力 30MW 級の先進ハイブリッドサイクロトロンのための等時性磁場発生用円形スプリットコイルを中心に試設計を行った。

(2) 超伝導コイルの高機械強度化

試設計を進めていく中で、現状技術の到達点との比較評価を行っていった結果、目標とするコイルシステムを開発するためには、コイルの更なる高機械強度化が最重要課題の一つであることがわかった。そこで、筆者らが先行研究で提案した「YOROI (Y-based Oxide superconductor and Reinforcing Outer Integrated) 構造」（引用文献②）をさらに改良・強化した支持構造を考案し、その効果を数値解析により検証していった。

4. 研究成果

(1) 超伝導コイルシステムの試設計

30MW 級先進ハイブリッドサイクロトロン用超伝導コイルシステムの開発を最終目標に、コイルシステムの試設計（設計最適化）を、GA（遺伝的アルゴリズム）・SA（シミュレーテッド・アニーリング）法を用いて行った。

等時性磁場発生用円形スプリットコイルの試設計結果の例を図 2 に示す。設計条件としては、ビーム軌道面の磁場分布（図 3。ビーム引出部での最大磁場：6T）、現状の REBCO テープ線材の超伝導特性（臨界磁場—臨界電流特性。印加磁場角度依存性を考慮）、機械強度（フープ応力：800MPa）等のもと、使用線材量の最小化設計を行った。設計変数は、コイル形状、コイル位置、通電電流である。

以上の超伝導コイルシステムの試設計を行った結果、制約条件の中で、機械強度が最も厳しく、それによって設計最適化が律則されていることがわかった。換言すると、機械強度を高めないと、超伝導特性を活かした設計ができないということがわかった。図 2 は、最大磁場を 6T とした場合の結果であるが、より小型化するために、10T 以上の高磁場化を想定した場合は、さらに 5GPa 以上の機械強度が必要となることが予想され、REBCO 超伝導コイルの現状技術での達成値 (2GPa) を上回る高機械強度化技術の開発が必要となる可能性があることが明らかになった。

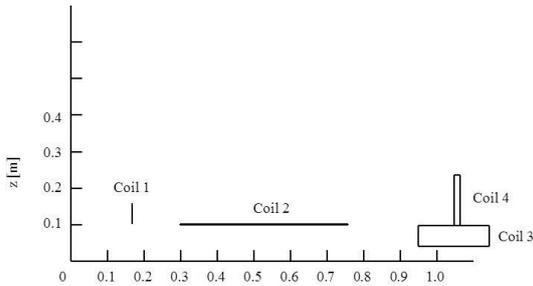


図 2. 等時性磁場発生用円形スプリットコイルシステムの試設計結果の一例。ビーム軌道面 ($z=0$ 面) を挟んで対称に Coil 1~4 が対を成して存在。

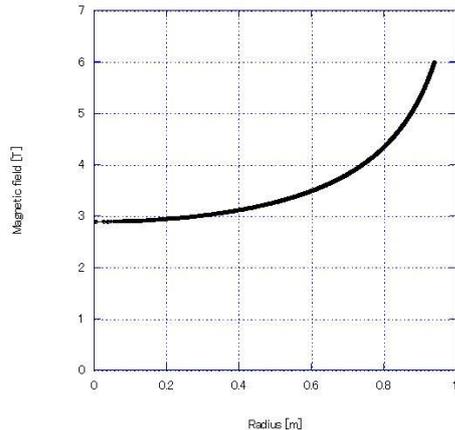


図 3. 出力 30MW 先進ハイブリッドサイクロトロンのための等時性磁場発生用円形スプリットコイルに必要なビーム軌道面の磁場分布

(2) 超伝導コイルの高機械強度化

超伝導コイルの巻線に作用するフープ応力は、磁束密度 B と電流密度 J および半径 R の積 ($B \times J \times R$) となる。従って先進ハイブリッドサイクロトロン用実規模コイルのような大口径 (メートル級) コイルで高磁場 (B) を発生させるためには、強大なフープ応力に抗するコイルの機械的強度が不可欠となる。そして機械的強度が高められれば、より高い電流密度 (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が可能となる。

先行研究で提案した YOROI 構造 (図 4) は、コイル巻線が径方向に拡張するように働くローレンツ力をコイル外周に設けた外枠を介してこれに接合された上下側板へ応力を分担させる構造となっている。加速器用コイルは高精度の磁場を発生させる役目を担うため、冷却・励磁時の熱応力・電磁応力による変形をできるだけ抑える必要がある。これに対し、YOROI 構造は、コイル形状を損なうことなく、高磁場・高電流密度化が実現できる支持構造といえる。YOROI 構造はこれまで試作コイルにより 2 GPa までの強度を確認しているが、5GPa 以上のフープ応力に耐え得る構造とはなっていない。そこで新たに Super-YOROI 構造を考案した。図 4 のように、YOROI 構造には無かった内枠を新たに設け、これも含めて上下側板に応力を分担することを可能とする構造となっている。本研究では、その効果について数値解析に基

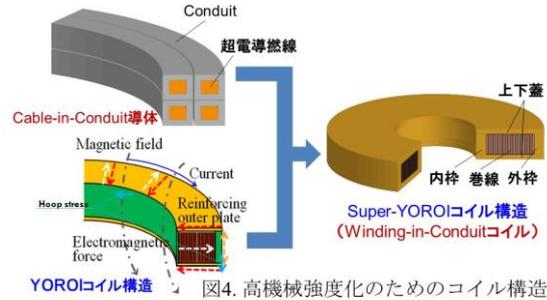


図 4. 高機械強度化のためのコイル構造

づいて検証を行っていった。

① 小型モデルコイル

構造解析に用いたモデルコイル (先行研究で試作・実験され、本研究で用いた構造解析プログラムの妥当性を確認したモデル) の諸元、コイルのメッシュ構造をそれぞれ表 1 と図 5 に示す。また、Super-YOROI 構造を適用したモデルコイルの軸方向断面の概略図を図 6 に示す。上段コイルの寸法は内直径 219mm、外直径 240mm、高さ 10.5mm であり、コイル巻線部は多層パンケーキ構造ではなく一体構造とした。Super-YOROI 構造はステンレス鋼 (SUS304) で構成されており、補強構造の寸法は内枠の厚み 6 mm、外枠の厚み 15 mm、上下側板の厚み 3 mm の解析モデルを作成した。コイル巻線の物性値には複合則を考慮し、その体積比率から大きく影響を与えるハステロイ、銅、ポリアミドの物性値から算出した。本来のコイル巻線構造が積層構造のため直交異方性を考慮し、線材軸方向 (c -axis) と線材平面方向 (ab -plane) の物性値を設定した。また、線膨張係数は温度依存性を考慮し、30K から 300K まで 10K ずつ 28 点のデータを用いた。コイル巻線と補強構造の間には接触条件を適用し、補強構造同士の間には接着条件を適用した。また、モデルコイルの周方向断面には対称境界条件が設定されている。下側板の底表面部に関しては軸方向 (Z 方向) の変位固定とし、補強構造の最内層とコイル周方向断面に関しては回転方向 (θ 方向) の変位固定とした。

まず、ローレンツ力解析について述べる。外部磁場 8 T 中で励磁電流密度を上昇させていった際のコイルに加わるローレンツ力とフープ応力の最大値を表 4 に示す。電流密度 2159 A/mm² (通電電流 7000 A) でローレンツ力は 56.5 MPa まで上昇し、フープ応力は 12.88 GPa にも及ぶ結果となった。また、この際のフープ応力はハステロイにのみ荷重がかかったものとして体積比換算している。

次に、ローレンツ力によるひずみの構造解析について述べる。前述のローレンツ力解析結果を静的荷重としてコイル各要素内面の境界条件に設定し、コイルの構造解析を行った。その結果から、コイル上における周方向応力最大値を図 7 に、周方向ひずみ最大値を図 8 に示す。各図における点線は REBCO 線材の強度限界である。Super-YOROI 構造では、

表 1 モデルコイル諸元

Parameter	Value
Coil winding	
Inner diameter	219 mm
Outer diameter	240 mm
Height	10.5 mm per a pancake coil
Material	YBCO (Hastelloy:Copper:Polyamid=1:1:1)
Super_YOROI	
Flame thickness	
Inner flame	6 mm
Outer flame	15 mm
Plate thickness	3 mm
Material	SUS304

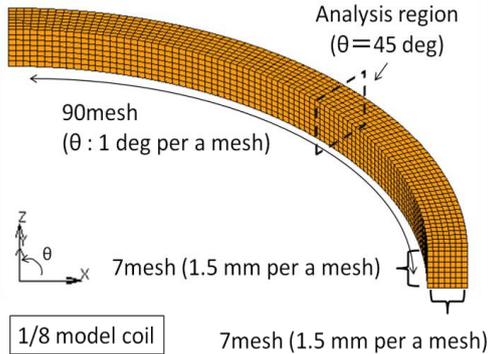


図5 モデルコイルのメッシュ構造

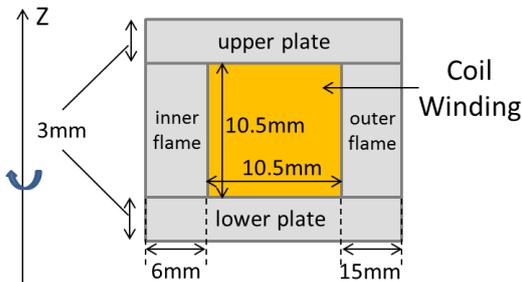


図 6 Super_YOROI 構造を適用したモデルコイルの軸方向断面概略図

表4 コイルに加わるローレンツ力とフープ応力の最大値

Operating current [A]	Current density [A/mm ²]	Lorentz force [MPa]	Hoop stress [GPa]
1500	463	7.0	1.59
2500	771	13.2	3.00
3000	925	16.7	3.69
3500	1079	20.6	4.70
4500	1388	29.3	6.68
5500	1696	39.3	8.95
6500	2005	50.5	11.50
7000	2159	56.5	12.88

電流密度 2159 A/mm² (通電電流 7000 A) のときに線材強度を超える周方向応力・ひずみがコイル上にかかっており、この点がこの寸法における補強限界であると考えられる。従って、Super-YOROI 構造は電流密度 2005 A/mm² (通電電流約 6500A) の励磁において約 11.5GPa のフープ応力に耐え得ることが可能となる。また、YOROI 構造では電流密度 925 A/mm² (通電電流 3000A) の励磁において約 3.69 GPa のフープ応力に耐え得ることが可能である。以上の結果より、Super-YOROI 構造

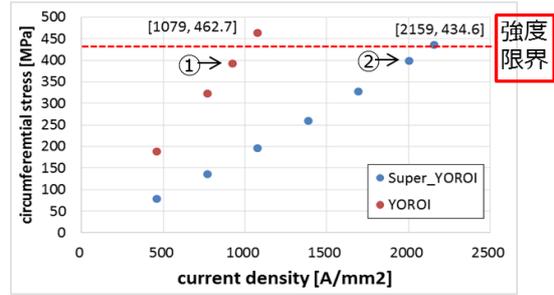


図 7 コイル上における周方向応力最大値

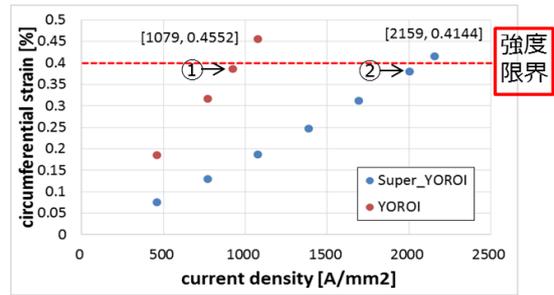


図8 コイル上における周方向ひずみ最大値

表 5 モデルコイル諸元

Parameter	Value
Coil winding	
Inner diameter	1000 mm
Outer diameter	1021 mm
Height	10.5 mm per a pancake coil
Material	YBCO (Hastelloy:Copper:Polyamid=1:1:1)
Super_YOROI	
Flame thickness	45 mm
Plate thickness	15 mm
Material	SUS304

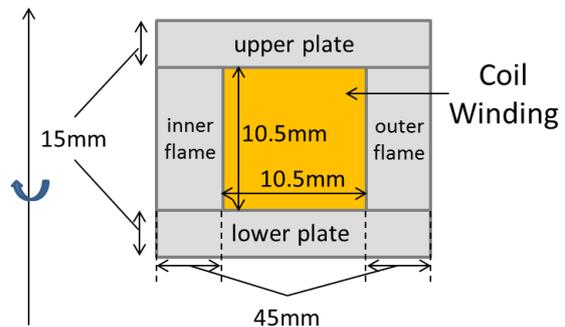


図 9 Super_YOROI 構造を適用したモデルコイルの軸方向断面概略図

の補強効果は、YOROI 構造の耐フープ応力に比べ、3 倍以上に上昇していると考えられる。また、この形状において電流密度は 2 倍以上に向上させることが可能であるという結果を得た。なお、ここでは線材の超電導特性 (臨界電流) は考慮せず、あくまで機械強度についてのみ評価を行った。

② メートル級モデルコイル

構造解析に用いたモデルコイルの諸元と Super-YOROI 構造を適用したモデルコイルの

軸方向断面の概略図の一例をそれぞれ表 5 と図 9 に示す。上段コイルの寸法は内直径 1000 mm、外直径 1021 mm、高さ 10.5 mm であり、補強構造の寸法は内外枠厚みが 45 mm、上下側板厚み 15 mm のモデルを作成した。また、コイルメッシュや構成材料の物性値、境界条件など他の諸条件に関しては小型モデルコイルと同様である。

まず、ローレンツ力解析について述べる。モデルコイルに外部磁場 50 T 中 (実規模に対しコイル肉厚が小さいので外部磁場を高めた) で電流密度 $500\text{A}/\text{mm}^2$ を通電した際のコイル上におけるローレンツ力解析結果を図 10 に示す。コイルに加わるローレンツ力はコイル最内層では約 38.8 MPa となり、コイル最外層で約 35.9 MPa となった。フープ応力はコイル最内層では約 13.0 GPa となり、コイル最外層で約 12.2 GPa となった。

次に、ローレンツ力によるひずみの構造解析について述べる。前述のローレンツ力解析結果を静的荷重としてコイル各要素内面の境界条件に設定し、構造解析を行った。その結果、巻線内の最大径方向ひずみと最大径方向応力はコイル最外層に現れており、それぞれ -1.749 % と -225.9 MPa の圧縮ひずみ・応力となった。これは、コイル巻線がローレンツ力により径方向へと拡張されるが、それを補強構造である外枠が応力を分担しており、補強構造による反発力を受けているためだと考えられる。また、コイルにおける最大周方向ひずみと最大周方向応力はコイル最内層に現れており、それぞれ 0.3822 % と 400.6 MPa の引張ひずみ・応力となった。これは、コイル最内層に加わるフープ応力が最外層に加わるそれより大きく、コイル最内層の方がより元の形状より拡張するためだと考えられる。径方向の圧縮応力、周方向の引張ひずみ・応力は線材の機械強度を超過していないため、今回のモデルコイルの構造においてはローレンツ力による線材特性の劣化は見られないと考えられる。また、ローレンツ力解析のフープ応力結果と構造解析のフープ応力結果を比較すると、コイル最内層では約 32 分の 1、コイル最外層では約 42 分の 1 となった。これにより、補強構造により応力の分担がされ、フープ応力が低減されていると判断できる。以上より、Super-YOROI 構造はコイル形状を保ち、低温・高磁場・高電流密の運転状況に耐え得る能力を有する可能性が示された。

Super-YOROI 構造はコイル巻線を補強構造で覆う構造を有するため熱収縮によるひずみの影響を受けやすく、線材特性の劣化が懸念された。そこで Super-YOROI 構造を適用した m 級モデルコイルを 300 K から 30 K まで冷却したときの構造解析を行った。その結果から、熱収縮によるひずみ・応力は様々な方向から力を受けるため複雑なひずみ・応力分布となるが、今回のモデルでは熱収縮による線材の劣化は起こらないと考えられる。

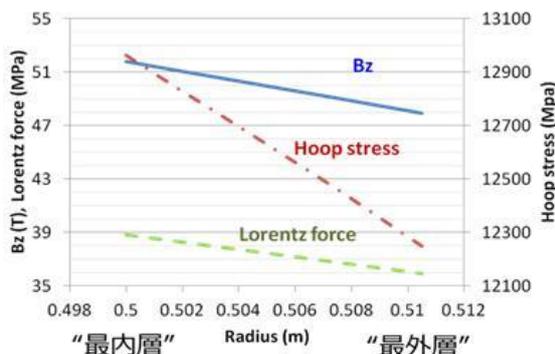


図10 ローレンツ力解析結果

<引用文献>

- ① H.Ueda, A.Ishiyama et al. “Conceptual Design of Next Generation Cyclotron”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.23, No.3, DOI: 10.1109/TASC.2012.2232955, 2013
- ② S.Nagaya, A.Ishiyama et al. “Development of High Strength Pancake Coil with Stress Controlling structure by REBCO Coated Conductor”, IEEE Trans. on Applied Supercond., 23, 3, 4601204, 2013

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 1 件)

Y.Kashiwazaki, A.Ishiyama, X.Wang, H.Ueda, T.Watanabe, S.Nagaya “Numerical evaluation of reinforcing effect of advanced Yoroi-coil structure for HTS coil” 2016 Applied Superconductivity Conference, Denver, Colorado, USA, Sep.4-9 (2016) (講演採択)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石山 敦士 (ISHIYAMA, Atsushi)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：00130865

(2) 研究分担者

野口 聡 (NOGUCHI So)
北海道大学情報科学研究科・准教授
研究者番号：30314735

植田 浩史 (UEDA, Hiroshi)

岡山大学・自然科学研究科・准教授
研究者番号：10367039

(3) 連携研究者

山川 宏 (YAMAKAWA, Hiroshi)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：00097263