

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：84502

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600150

研究課題名(和文)永久磁石を用いた磁場調整機構付き次世代光源用偏向磁石の開発

研究課題名(英文)Development of Permanent Magnet-based Field-variable Dipole Magnet for Next Generation Light Sources

研究代表者

渡部 貴宏 (Watanabe, Takahiro)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・加速器部門・副主席研究員

研究者番号：90282582

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：次世代放射光源用に永久磁石を導入することで、省エネ、且つ電源トラブルのない新たな加速器コンセプトの実現を究極の目標とし、本研究課題において、まず基本となる偏向磁石の永久磁石化を検証した。これまで永久磁石が採用されなかった背景として、磁場分布の均一性、永久磁石の温度依存性、磁場調整機構、放射線減磁等の課題があった。そこで、本研究課題では、これらを解決する磁気回路を設計し、試作、性能評価することで原理実証試験を行った。結果、主要な課題を概ね解決する結果が得られ、当初の想定を上回る成果が得られた。実際、国内最大の次世代放射光源計画へ採用する方向となり、また、国内外からも問い合わせが来るに至った。

研究成果の概要(英文)：Permanent magnet based dipole magnets have been developed for next generation light sources. Permanent magnet is advantageous over conventional electromagnet in terms of power consumption and less power supply related failures. There are, however, reasons why such magnets have not been chosen as main magnets for light sources, such as field quality, temperature dependence of magnetic field, adjustability of magnetic field, and demagnetisation due to radiation. We had designed magnetic circuit for solving these issues, and the magnet was fabricated. As a result, it was experimentally verified that the newly designed dipole magnet work almost fully as expected, and so far nothing has prevented us from going for permanent magnets. In fact, a discussion on a feasibility of such magnets for the latest next generation light source project in Japan has seriously started, other positive comments have been given from outside. Further study will be continued.

研究分野：加速器

キーワード：加速器 蓄積リング 磁石 永久磁石 次世代光源 将来光源 回折限界光源

## 1. 研究開始当初の背景

本研究課題を申請した平成 25 年度から研究を開始した平成 26 年度初頭、世界各国にある光源施設の多くにおいて次世代放射光源計画案が提案されていた。それらの計画はその全体的な方針としては概ね同じベクトルを向いており、光源性能として重要な指標である「輝度」の向上を目指すというものであった。主だったものとしては、ESRF (ヨーロッパ) や APS (アメリカ) SPring-8 (日本) がそれぞれアップグレード計画を提案し、どの計画も、現在よりも数十倍明るい輝度を実現すべく、ラティス (放射光リング型加速器を構成する磁石配列) を一新する案が示された。これらの世界的な潮流は本報告書を執筆している平成 28 年度においても続いており、各計画の中身がより成熟したものにへと変遷してきている。

一方、各計画には差異も見られた。代表的な例としては、輝度が明るい (加速器を周回する電子のエミッタンスが小さい) 光源加速器を設計するに際し、建設コストや維持コスト (消費電力) を度外視する計画もある一方、我々は、コストを下げた上で目標とする輝度を達成することが我が国における社会的な要請に合致していると考えた。これが本研究課題であり、リング型加速器を構成する磁石配列のうち、最も基本となる偏向磁石 (二極磁石) を永久磁石に置換することで消費電力を大幅に削減する案を提案した。

しかし、これまで、限定的な永久磁石の利用例はあるものの、ラティスの基本となる多数の磁石に永久磁石を導入した前例はない。なぜなら、永久磁石を導入するには後述するような様々な課題があるからである。

そこで、研究開発当初、我々はまず永久磁石を実現するための開発課題を整理し、その課題に対する解決案 (磁気回路の設計案等) を示すことで、永久磁石を実現するための方針を示した。永久磁石を実際の加速器に導入するには特に実績が不足しており、本研究開始当初は、その実績不足から、実際の光源加速器へ採用するに至る状況とは大きくかけ離れていた。

以上が、研究開始当初の背景であり、結果的に、本報告書を作成している平成 28 年度において、次世代放射光源計画における永久磁石の位置づけがどのようになってきたかについては、「4. 研究成果」にて述べる。

## 2. 研究の目的

次世代放射光源、あるいは一般的な加速器の主要磁石に永久磁石を導入することを長期的な研究目標とし、そのための磁石設計、製作、性能評価を本研究課題の目的とした。また、世界に先駆けてこういった永久磁石の研究を総括的に行い、且つその結果を体系的に纏めて公開することで、重要なキーワードとなっている実績に貢献することを重要な目標とした。

以下に、具体的な目的を示す。

非常に高い安定性、信頼性を要求される加速器に永久磁石を導入する場合の課題として、

- (1) 永久磁石が材料上有している温度依存性を補正するような磁気回路を構築する。
- (2) 磁場調整機構を可能にする。
- (3) 永久磁石の放射線減磁を最大限抑制する。

が挙げられる。換言すれば、これらの問題が、これまで加速器の主要な磁石において永久磁石が採用されてこなかった理由となっている。そこで、これら全てを解決する案を提案し、試作・試験を通して実証することを具体的な目的とした。

研究を通し、上記(1)~(3)の各課題に対して導き出した解決案、およびその実証試験結果を、以下に述べる。

## 3. 研究の方法

ラティスを構成する偏向磁石の永久磁石化を研究対象とし、まず、上記(1)~(3)を解決する磁気回路設計を行い、これを数値計算により確認、最適化する。次に、この磁気回路を実現する実際の磁石設計 (詳細設計) を行い、製作する。ただし、実際の加速器に用いられる偏向磁石は、通常 1 台 1メートル程度あり、本研究課題による予算でこれを製作することは困難なため、磁石の断面形状は本番と同じものを設計しつつ、磁石長は 300mm 程度にすることで試作を可能なものにした。また、課題申請時から実施開始時に至る間、世界の次世代放射光源計画において Longitudinal Gradient Bend (あるいは、Longitudinal Gradient Dipole) と呼ばれる、電子ビーム進行方向に偏向磁場が変化する磁石の採用が主流となったため、これに適合した磁石を製作、検証することとする。

検証結果は、極力体系的な知見として纏め、次世代放射光源を検討する国際ワークショップ、および加速器の一般的な国際会議において公開することで、これまで実績がほとんどなかった永久磁石に関する総括的な議論の場を提供した。

## 4. 研究成果

設計した磁気回路の概念図を図 1 に示す。今回、永久磁石と鉄とのハイブリッド型偏向磁石を採用することとした。永久磁石と電子ビーム軸との間に比透磁率が約 5000 ある鉄を十分な厚さで配置することで、仮に永久磁石の磁化分布 (強度、方向) にバラツキがあっても、ビーム軸上の磁場分布は均一になる形状とした。電気回路とのアナロジーで説明すると、永久磁石による起磁力 (電気回路における起電力) に空間的な分布があっても、磁気抵抗 (電気抵抗) が極めて小さい鉄ブロック内でほぼロスなく磁束 (電流) が行き渡る、ということになる (磁気抵抗は比透磁率の逆数に比例)。また、電子ビームと永久磁

石の間に数十ミリの厚さを持つ鉄材があることで、電子ビームによる放射線減磁も最大限に抑制することが出来るようになった。

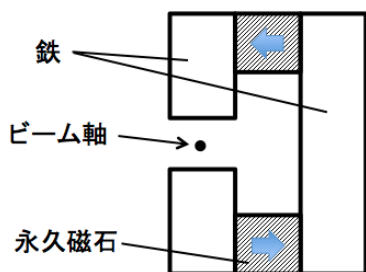


図1 設計した磁石断面（概念図）

課題(1)については、永久磁石が持つ温度依存性（ネオジウム磁石の場合、磁石の温度が1度上昇すると磁束が0.05～0.1%低下する特性）を補正すべく、整磁合金と呼ばれる、鉄とニッケルからなる合金を磁気回路に追加した。整磁合金は、永久磁石の約10倍の温度依存性があり（合金の温度が1度上昇すると、飽和磁束密度が1%弱程度低下）、永久磁石の作る磁束の一部（理論的には、永久磁石の温度係数と整磁合金の温度係数の比に相当する割合）を整磁合金側にバイパスさせることで、ビーム軸上に流れる残りの磁束が温度に関わらず一定になるような磁気回路を設計した。

課題(2)については、磁束密度が一定となる電磁石と違い、磁束が保存される永久磁石の特徴に着目し、永久磁石がつくる磁束の一部を敢えてOuter plateと呼ぶ外部磁性体に漏らすことで、Outer plateを機械的な動きによってビーム軸上に流れる磁束の量を変化させる磁気回路を考案した。

課題(3)については、ハイブリッド型磁気回路に加え、永久磁石のパーミアンス係数（永久磁石がどれだけ強い逆地場に晒されているかを示す指標。逆磁場が強く、永久磁石が作る磁場が少ない時に係数は小さくなり、逆磁場が小さい時に大きくなる）の観点から知見を整理した。つまり、課題(3)が懸念される背景に、アンジュレータにおける永久磁石の放射線減磁がある。放射光源において電子から放射光を放射するために用いられる周期磁場構造アンジュレータは、長年光源加速器において用いられてきたが、各所において放射線減磁が確認されてきた。そのため、次世代光源の偏向磁石に用いた場合にその磁石が減磁し、安定な加速器の運転に支障をきたさないような磁石設計が必要となる。しかし、永久磁石による偏向磁石を数値計算したところ、偏向磁石のパーミアンス係数は5～10程度であり、アンジュレータのパーミアンス係数0.1～1程度に比べ、約1桁高いことが確認された。永久磁石による放射線減磁のメカニズムは厳密な意味では明らかになっ

ていないが、筆者らが理解する限り、永久磁石に入射した放射線（電子）が局所的にエネルギーをDepositし、その箇所の磁石温度が瞬時に上昇することでBH曲線の第2象限が変形し（減磁曲線）、一般的な熱減磁と類似した減磁が起きると考えられる。この理解が正しい限り、仮にアンジュレータに用いられている永久磁石と全く同一の磁石材で永久磁石を製作したとしても、パーミアンス係数が5～10程度と高いことによって、減磁量はアンジュレータのそれと比べ大幅に少ないことが予想される。

以上のような磁気回路設計に基づく実際の磁石を製作した結果を図2に示す。既に述べた通り、今回はLongitudinal Gradient Bendを試作したため、写真の通り1台の偏向磁石は異なる磁場を持つ3つのセグメントから構成されている。

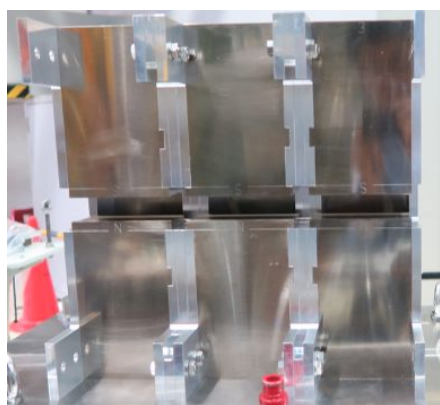


図2 試作した永久磁石型偏向磁石

課題(1)を検証した結果を図3に示す。図3は、磁石温度を20度から30度まで変えた場合のビーム軸上磁束密度を示しており、赤点は、整磁合金を入れていない通常の状態である。この時、摂氏10度磁石温度が上昇することで磁場が約0.8%弱変化しており、温度係数が-0.8%弱に相当する温度依存性が見られている。一方、整磁合金を入れた青点は、磁石温度の変化に関わらずビーム軸上磁束密度がほぼ一定になっていた。これにより、課題(1)の実証実験は概ね良好な結果を得たと言える。

課題(2)の検証については、予算の都合上、今回製作した磁石に設置するOuter plateを製作することが出来なかったため、以前より有していた偏向磁石用の簡易的なOuter plateを使用することで、原理実証を行った。図4の横軸が、Outer plateの機械的位置を示し、縦軸はビーム軸上の磁束密度となっており、赤点が実測結果、実線が3次元数値計算結果となっている。Outer plateを動かすことで、ビーム軸上に流れる磁束とOuter plateに漏れ出す磁束の割合が変化し、これ

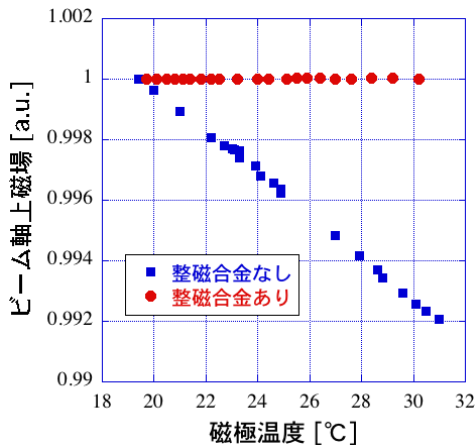


図3 磁石の温度依存性（測定結果）

によりビーム軸上の磁束密度が変化している様子が分かる。また、3次元数値計算結果と概ね一致する結果を得た。ただし、数値計算における磁束密度の絶対値については、計算に入力する磁石の特性（残留磁束密度、保持力）によって変わるため、材料の公称値を元に、数値計算と実測が概ね合致するよう調整した。実用においては、ビーム軸上の磁束密度をホールプローブ等で計測しながら Outer plate を調整することが想定されるため、詳細な絶対値の違いについては問題ないと考えられる。

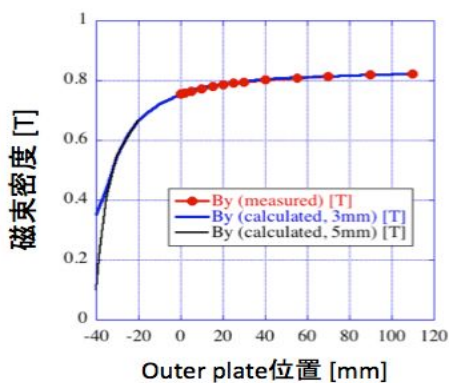


図4 Outer plate による磁場調整機構

課題(3)については、今回の研究で達した仮説の検証をすべく、今後、実際に照射試験を行うことで検証していく予定である。つまり、全く同じ磁石材料を用い、パーミアンス係数が異なる環境下に磁石を設置した上で放射線（電子ビーム）を照射し、減磁量に差があるか否かを確認する。

冒頭で述べた通り、本研究では、永久磁石に関する研究結果を体系的に纏め、公の場で公開、議論することで、現在策定が進む次世代放射光源計画へ重要な知見を与える、とい

うことも目的としていた。今回の一連の永久磁石設計、および実証試験は、申請当初に想定していた成果を上回るほど良好であり、正式な国際学会（7th International Particle Accelerator Conference 2016, Busan, Korea）、次世代放射光源に特化したワークショップ（5th Diffraction Limited Storage Ring Workshop 2016, Hamburg, Germany）に加え、大小様々な会合で結果を紹介するに至り、概ね好意的な反応を得た。実際、これらの研究結果を通し、我が国最大の放射光施設 SPring-8 の次期計画へ採用する方策が真剣に検討されることとなり、申請時に想定していたシナリオ以上に本研究課題を推進するに至った。本研究課題の採択に感謝する。

今後、実用化には未だ達成すべき課題はあり、実績を積むことが特に重要であるため、今後も引き続き開発、実証試験を継続し、省エネ型・省メンテナンス型加速器の実現を目指したい。

また、本研究のような課題を論文として発表するには、より年月をかけて慎重に検証する必要があるが、極力早い段階で論文投稿を行っていきたい。

#### 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）

〔学会発表〕（計3件）

渡部 貴宏、「次世代放射光リングに向けた国内外の放射光施設の動向」、第29回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム（JSR2016）招待講演、千葉、January 9-11, 2016.

T. Watanabe et al., "SPring-8-III storage ring development", 5th Diffraction Limited Storage Ring Workshop, March 9-11 (2016), Hamburg, Germany.

T. Watanabe et al., "Magnet Development for SPring-8 Upgrade", 7th International Particle Accelerator Conference, May 8-13 (2016), Busan, Korea.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

渡部 貴宏 (WATANABE, Takahiro)

公益財団法人 高輝度光科学研究センター  
加速器部門・副主席研究員

研究者番号：90282582

##### (2) 研究分担者

深見 健司 (FUKAMI, Kenji)

公益財団法人 高輝度光科学研究センター  
加速器部門・副主幹研究員

研究者番号：60463311