

プログラム名：ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現

PM名：佐野 雄二

プロジェクト名：レーザー加速XFEL実証

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平 成 2 8 年 度

研究開発課題名：

マイクロアンジュレータの開発

研究開発機関名：

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

研究開発責任者

山本 樹

# I 当該年度における計画と成果

## 1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

本研究開発プログラムにおいては、X線自由電子レーザー (XFEL) の小型化開発を目標にする。本研究開発においては、そのために必須となるアンジュレーターの小型化を追求する。その磁場周期長を従来の数十 mm から数 mm へと約一桁短縮するための要素技術開発と装置化するための開発を行い、マイクロアンジュレーターを実現する。平成 28 年度においては、(1) 極短周期アンジュレータ磁場生成法の確立 (2) 極短周期アンジュレータ磁場の測定・評価法の確立 (3) 極短周期アンジュレータ製作技術の確立、の 3 項目について研究を行う。さらに (4) 実在電子ビームを用いた評価研究の準備を行う。

**項目 (1)** については、周期長 4mm の極短周期アンジュレータ磁場生成法の確立を目標とする。さらに、板状磁石を長手方向に連結する場合の磁場調整法、板状磁石の両端部磁場の調整法について検討する。

**項目 (2)** については、微小な磁気感受域を持つホール素子を極薄のホルダーに装着した測定装置を自作して開発に用いる。精密スライド機構の整備、スライド機構制御プログラムの作成を行う。極薄のホール素子ホルダーを製作し、スライド機構に装着することにより、ギャップ 1mm 程度までの磁場測定・評価を可能にする。

**項目 (3)** については、項目 (1) で開発する周期長 4mm の磁石を利用して、アンジュレータ本体を製作することによって、極短周期アンジュレータ製作技術の確立をはかる。この時、狭小な磁石間ギャップを実現するために、磁石を真空中に収納する真空封止型アンジュレータとして実現する。また、狭小な磁石ギャップを精密に駆動できる高精度の駆動機構を開発する。

**項目 (4)** では、項目 (3) で開発する極短周期アンジュレータを利用して、実電子ビームを用いた放射およびアンジュレータの性能評価のための加速器の検討、および最適の設置方式の策定を行う。

## 2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

### 2-1 進捗状況

平成 28 年度においては、上記 (1)、(2)、(3) および (4) の各項目について、以下の様に研究開発を実施した。

**項目 (1)** は本研究開発の主要部分を占める。平成 26・27 年度における本プログラム研究、および科研費等の先行研究において開発した多極着磁法に改良を加えることによって、より短周期・より高強度・より高精度のアンジュレータ磁場を生成する方法を探索する。平成 28 年度においては、周期長 4mm を目標として、パルス電磁石 (着磁コイル) を含む着磁器の作成を行い、磁気回路作成を試みる。この場合長さ 100mm×厚さ 2mm×幅 20mm の板状の NdFeB 磁石素材を上記着磁器で着磁することにより、約 25 周期分のアンジュレータ磁石列を 1 枚の磁石板上に作成する。このようにして作成した 2 枚の板状磁石を互に対向させることにより、その隙間 (磁石間ギャップ) の中心軸上に極短周期アンジュレータ磁場を生成することができる。さらに、板状磁石を長手方向に連結する場合の磁場調整法、板状磁石の両端部磁場の調整法について検討する。

**項目 (2)** については、微小な磁気感受域を持つホール素子を極薄のホルダーに装着した測定装置を自作して開発に用いる。精密スライド機構の整備と極薄のホール素子によって、ギャップ 1mm 程度までの磁場測定・評価を可能にする。

**項目 (3)** については、高精度のアンジュレータギャップ駆動機構を開発することによって、極短

周期アンジュレータ製作技術の確立をはかる。この時、狭小な磁石間ギャップを実現するために、磁石を真空中に収納する真空封止型アンジュレータとして実現する。

**項目 (4)** では、項目 (3) で開発する極短周期アンジュレータを利用して、実電子ビームを用いた放射およびアンジュレータの性能評価をおこなう。平成 28 年度は、主にアンジュレータを設置する加速器の検討を行い、最適の設置方式を策定する。極短周期アンジュレータ製作に関するメーカーへの技術移管について具体的な検討を行う。

## 2-2 成果

平成 28 年度においては、上記の各項目について、以下の成果を得ることができた。

**項目 (1)** 板状の NdFeB 磁石の製作において、長さ 100mm×厚さ 2mm×幅 20mm のものより長尺の素材（長さ 152mm×厚さ 2mm×幅 20mm）の製作に成功している。この磁石板を対向させることにより、磁石間ギャップの中心軸上に極短周期アンジュレータ磁場を生成することができる。現在、ギャップ 1.6mm において約 3kG の非常に良好なアンジュレータ磁場を得ることができた（どちらの長さの磁石板についても）。実測磁場に基づいて行ったスペクトル計算は、このアンジュレータ磁場から得られる放射が理想磁場からのものと比べても遜色ないものであることを示している。

さらに、長尺の磁石を得るためにはこれらの磁石板を複数枚連結することが必要になる。そのため、板状磁石を長手方向に連結する場合の着磁方式を確立することができた。

**項目 (2)** については、微小な磁気感受域を持つホール素子を極薄のホルダーに装着した測定子の開発を行った。厚さ 1.0mm の銅製ホルダーに、ホール素子を装着した測定子を製作した。ホール素子の空間分解能（感受領域）は 0.05mm × 0.05mm である。アンジュレータ中心軸に沿ってホール素子を駆動する精密スライド機構を整備した。

**項目 (3)** については、極短周期アンジュレータギャップ駆動機構の設計・製作を行った。平成 28 年度には、磁石長 200mm 用と 500mm 用との 2 種類のギャップ駆動機構を設計・製作した。設計仕様は、狭小な磁石ギャップを精密に駆動できる高精度の駆動機構に対する要求（0.1micron 以上の高分解能）を満足している。また、磁石を真空中に収納する真空封止型アンジュレータとして開発した。

**項目 (4)** では、アンジュレータを設置する加速器の検討を行い、最適の設置場所として、東北大学・電子光理学研究センター S-band linac (ImPACT 佐野プロジェクト Pj3L) と理化学研究所・播磨事業所に構築中のレーザー加速統合プラットフォーム (ImPACT 佐野プロジェクト Pj1A) を選定した。上記 2 か所に磁石長 200mm 用駆動機構を設置し、放射およびアンジュレータの性能評価試験の準備を行っている（東北大・電子光センターには先行研究で製作した同仕様の駆動機構を設置した）。磁石長 500mm 用の駆動機構については、平成 29 年度中の設置を目標に準備中である。

## 2-3 新たな課題など

## 3. アウトリーチ活動報告

平成 28 年度の研究開発成果は、国内会議、国際会議および論文などで公表していく。またアンジュレータに関するシンポジウムの開催も検討している。