

氏 名 土屋 公央

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大乙第 243 号

学位授与の日付 平成28年3月24日

学位授与の要件 学位規則第6条第2項該当

学位論文題目 PFリングにおける可変偏光アンジュレータの開発研究

論文審査委員 主 査 教授 中村 典雄  
教授 加藤 龍好  
教授 本田 融  
教授 雨宮 健太  
教授 山本 樹  
准教授 原田 健太郎  
センター長 濱 広幸 東北大学

論文内容の要旨  
Summary of thesis contents

電子エネルギー2.5GeVの電子蓄積リングであるPFリングでは、2005年に直線部増強を目的とした改造が行われ、これによってアンジュレータ用長直線部の長さが伸長された。改造によって伸長した長直線部を最大限に生かすために、BL02、BL13、BL16、BL28で電子物性用アンジュレータの更新が行われ、PFリングに5台の可変偏光アンジュレータ(EPU: elliptically-polarizing undulator)が建設された。これらのEPUはAPPLE (Advanced Planar Polarized Light Emitter) -II型EPUがU#16-1、U#16-2、U#13の3台であり、6列型EPUがU#02-2、U#28の2台である。これらのEPUは全て水平・垂直直線偏光、左右円偏光、左右楕円偏光モードを切り替えて使用することができ、U#16-1とU#16-2はキッカーシステムとの組み合わせで偏光の高速スイッチングを行える。これら全てのEPUが既にユーザー運転に利用されている。

本論文の研究は、EPUに関する開発研究であり、上のPFリングにおける5台のEPUの建設と運用を通して行われたものである。その1つが磁場調整方法と磁場測定システムの開発研究である。特にU#16-2においては、その後の3台のEPUにも応用された個別磁石磁場の重ね合わせによる初期磁石配列の最適化方法を開発した。アンジュレータでは永久磁石が多数使用されるが、個別磁石の磁場強度や磁化角度等の磁場特性は少ないとはいえずつきを持っている。このためアンジュレータ磁気回路を構成したとき得られる磁場分布は、理想的な場合と異なっている。必要とされる放射光源性能を満たすためには、理想磁場分布からのずれを十分小さくするための磁場調整作業が必要である。EPUでは通常のアンジュレータよりも多数の永久磁石が使用される上に、磁石列配置を複雑に制御することで様々な偏光状態を作り出すために、その磁場調整手順も複雑となる。また、磁場調整及び磁場測定に要する時間も膨大となる。この問題を解決するためにPFリングでのAPPLE-II型EPUの建設にあたって最適な磁石配列を予め求める新手法を開発した。この方法は個別に測定した各磁石の磁場分布を重ね合わせることで最適な磁石配列を求めている。この方法で得た初期配列磁場分布の特性(半周期毎の1次磁場積分分布)は非常に良好で、その後は簡単な微調整のみで従来方法よりもばらつきの小さい磁場分布を得ることができた。これによりU#16-2の磁場調整においては必要な磁場調整期間をU#16-1の五分之一に短縮し、調整に必要な労力を大幅に減らすことに成功した。この個別磁石磁場の重ね合わせ法は、その後に建設した全てのEPU(U#02-2、U#13、U#28)においても採用されて良好な結果を得た。

PFリングにおけるAPPLE-II型EPUの運転、特にU#16-1とU#16-2を用いた高速偏光切り替え運転の実現に当たっては、APU方式(EPUのギャップを固定し磁石列をスライドすることで光のエネルギーを変える方式)を導入することに成功した。最終的には、左右の磁石列ペアを動かすAPU- $\sigma$ モードの採用と検証を行うことで、PFでのAPPLE-II型EPU運転方法を確立した。EPUのギャップを固定したまま、偏光モードや光子エネルギーを制御するAPU方式の利用は、電子ビームへの影響が少なく、電子ビームの軌道制御が難しいU#16-1とU#16-2の高速偏光切り替え運転には特に有効である。APPLE-II型EPUであるU#16-1、U#16-2、U#13の3台ともAPU- $\sigma$ モードの運転方式を採用して、ユーザー運転が順調に行われている。また、EPU設計に必要な放射光計算コードも開発し、APU方式を導入した際に明らかになった円偏光モードでのスペクトル強度低下の問題に対してこのコードによるス

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

ペクトル解析を行って原因を特定した。

周期長が 160mm と長い EPU である U#02-2 及び U#28 では、6 列型 EPU を採用し、設計・建設を行った。従来の 6 列型 EPU は左右円（楕円）偏光を切り替えるもので水平・垂直直線偏光を切り替えることはできなかった。ここでは 6 列の磁石列を個別に駆動して縦横磁場を独立に制御することで、水平・垂直直線偏光、左右円偏光、左右楕円偏光モードを切り替えて使用することを実現した。これは 6 列型 EPU としては初めての試みであり、U#02-2 及び U#28 はこの実証機となった。

結論として、PF での EPU 建設に当たり、初期磁石配列の最適化方法を開発し、従来の方法よりも良好な磁場分布を得ると共に EPU の磁場調整に要する労力と時間を大幅に短縮した。これによって磁石列を 4 本持つ APPLE-II 型 EPU のみならず、様々な偏光モードをもつ 6 列型 EPU の実現にも貢献した。合わせて PF リングでの高速偏光スイッチング運転に適した APPLE-II 型 EPU 運転方法を確立した。

Summary of the results of the doctoral thesis screening

PF リングでは 2005 年に直線部増強のための改造によってアンジュレータ用の全ての長直線部が伸長されて、そこに様々な偏光状態を実現できる可変偏光アンジュレータ (EPU: elliptically-polarizing undulator) 5 台が新たに建設された。U#16-1、U#16-2、U#13 の 3 台が 4 磁石列の APPLE (Advanced Planar Polarized Light Emitter) -II 型、U#02-2 と U#28 の 2 台が 6 磁石列型であり、既にユーザー実験に利用されている。土屋氏はこれらの全ての EPU の建設に携わり、U#16-2 製作後の磁場調整と運用及びその後のアンジュレータ 3 台 (U#13、U#02-2、U#28) の建設と運用については中心的な役割を果たしてきた。

土屋氏がこれらの EPU を通して行った主な開発研究が、磁場調整方法の開発研究である。磁場調整は、アンジュレータ光のスペクトル性能を向上するための重要な工程であり、特に磁場分布のばらつきによって劣化しやすい高次光の強度を改善できる。従来の方法では初期の磁石配列では十分に良い磁場分布が得られないために、磁石交換作業が多数回必要となり、多くの時間と労力がそれに費やされた。EPU は磁石列が多いために、交換作業がさらに煩雑で時間がかかる。土屋氏は、個別に 1 つ 1 つの磁石の磁場を予め測定し、その重ね合わせによって初期の磁石配列を最適化する方法を開発して実用化した。4 台の EPU (U#16-2、U#13、U#02-2、U#28) に対してこの方法を適用した結果、初期磁石配列の段階で測定した磁場分布は要求仕様を満足し、その後の簡単な磁石の位置調整のみで磁場分布のばらつきを従来の調整方法の半分に抑えることができた。その結果、面倒な磁石の交換作業を省略することに成功している。この方法によって U#16-2 の磁場調整時間は従来の方法を用いた U#16-1 の磁場調整時間の約 1/5 になり、調整に必要な時間と労力を大幅に削減できた。この磁場調整法の開発では焼結後の湾曲で生じる磁石中心と磁場中心の微小なずれを揃えるように磁石の研磨加工方法も改良した。さらに、土屋氏はこの調整に使われた高速磁場測定システムの開発にも携わり、高速測定でのノイズ除去と必要な測定精度を得るのに有効な 2 重移動平均を用いたデータ処理方法も開発している。

土屋氏はまた、SPring-8 で楕円偏光発生のために開発された 6 磁石列型アンジュレータを 2 つの EPU (U#02-2 と U#28) に応用した。6 磁石列型では、APPLE-II 型 EPU に比べて発生できる水平磁場が弱い、垂直磁場の一様性や円偏光度のギャップ依存性に優れているために、周期長が長く電子ビーム軌道の振幅が大きい U#02-2 と U#28 に適している。6 つの磁石列を独立駆動にすることで、6 列型 EPU で初めて全ての偏光モードを実現できるようにした。その他、APPLE-II 型 EPU でも磁石列の位相制御によって光子エネルギーを変える APU 方式を導入して、PF リングでの高速偏光スイッチング運転に適した APPLE-II 型 EPU の運転方法を確立した。また、これらの EPU 設計に必要な放射光計算コードの開発も行っている。

以上、本論文には土屋氏が PF リングの EPU を通して行った実用性の高い開発研究が示されている。これらの開発研究は EPU の技術と性能の向上に貢献し、今後建設されるアンジュレータへの応用と発展が大いに期待できる。また、本論文の研究内容は国際学会で複数回発表され、中心となった磁場調整法の開発研究は査読付きの国際的学術誌に掲載されている。審査委員は全員一致で土屋氏の研究内容が博士論文に値すると判断した。