

大型加速器と小型加速器

小型放射光発生装置 AURORA

宮出 宏紀*

Compact Synchrotron Light Source AURORA

Hiroki MIYADE*

Abstract

We have been developing compact SR source since mid 1980's. The first AURORA, which is the superconducting SR ring, was transferred to Ritsumeikan University in 1996. The following machine AURORA-2 has the normal-conducting high field (2.7 T) magnets for the bending magnets. There exists two versions; the one is AURORA-2D, a version having quadrupole Doublets and the other AURORA-2S, a version having quadrupole Singlets. HiSOR at Hiroshima University is the A2D-type and was built in 1997. One A2S exists in our Tanashi works and is supplying SR-photons to the users over 2000 hours a year.

1. はじめに

小型放射光発生装置は当初、産業用 X 線リソグラフィ光源として開発が始められたが、その後、さまざまな用途が見出され、現在では、分析や微細加工技術などに広く用いられている。

住友重機械工業株式会社では、1980 年代中頃より、小型放射光発生装置の開発にとりかかり、これまでに 3 種類の AURORA シリーズを世に送り出した。ここでは、これら 3 種の AURORA についての解説をしたい。

2. AURORA-1

AURORA の 1 号機は、単体の超電導磁石から構成され、完全円形をしている。電子集束のためのデバイスはなく、主磁石ポール面を加工することにより、弱集束機能を持たせている。装置外径はおおよそ 3 m、電子は直径 1 m の円形軌道を回る^{1,2)}。このように小さな軌道に電子入射が可能となった大きな要因は、1/2 共鳴入射法の発見である^{3,4)}。

また、単体磁石の中に主要機器を詰め込んだ真空チェンバーを納めた構造であるために、真空排気の問題が切実であったが、これも、クライオパネルの開発により解決することができた⁵⁾。

ところで、単体磁石で構成することによって、思わぬ副産物を 2 つ得ることができた。ひとつは、磁石

自体が放射線遮蔽体となるということで、外部漏洩放射線の少ない装置の提供が可能となったこと。この、自己シールド型加速器という概念は、AURORA-2 にも受け継がれている。

もうひとつは、電子軌道上で誤差磁場が極めて小さいことである。通常、垂直方向のエミッタンスは、水平方向エミッタンスの 10% ほどが混入していると言われているが、AURORA の場合はほとんど 0 である。したがって、垂直方向のビームサイズは極めて小さく、何の手立ても施さないと 10-15 μm ほどである⁶⁾。通常の放射光発生装置で誤差磁場の原因となるのは、複数の磁石の配置精度や四極磁石の回転に起因するが、AURORA のように単体磁石から構成された場合は、その磁石の加工精度だけに因る。そして、現代の加工精度は非常に高く、よって、このような高精度の磁場を得ることができたのである。

電子ビームの入射には、コンパクト性やビームの質（特にエネルギー広がり）を考慮して 150 MeV レーストラック型マイクロトロンを採用した。このマイクロトロンも弊社独自に開発したものであり、その後の AURORA-2 の入射器としても用いられることとなったばかりでなく、日本原子力研究所関西研究所にも単体で納められている⁷⁾。

当初、AURORA は、弊社田無製造所内に建設された。1989 年に電子ビームの入射・加速・蓄積に成功して以来、さまざまな R&D と放射光の産業利用への

* 住友重機械工業株式会社 技術開発センター Sumitomo Heavy Industries, Ltd. Research & Development Center (E-mail: Hrk_Miyade@shi.co.jp)



図1 立命館大学における AURORA

模索がなされたのち、1996年に立命館大学へ移設となった。移設となった後にも、立命館大学SRセンター⁸⁾ではAURORAを精力的に利用し、多大な成果を挙げている⁹⁾。

図1は、AURORAの立命館大学における現在の姿である。

3. AURORA-2D

AURORA-1では、主磁石に超電導を採用したが、これがしばしばトラブルの元となった。また、一度トラブルを起こすと復旧に時間がかかることは、半導体製造メーカーがX線リソグラフィーを導入するにあたり大きな障害となると思われた。

そこで、2号機は、常電導磁石で構成することが基本コンセプトとなり、常電導高磁場磁石の開発からスタートした。われわれが開発した常電導高磁場磁石は、鉄ヨークを用いて、磁束密度2.7 Tまで発生することができる。アイデアは単純で、ポールを根元に行くほど大きくなる楔形とすることにより、飽和する部分をポールの先端だけに止めようとするものである。しかし、このアイデアを実現するにあたっては、設計段階において慎重なシミュレーションを必要とした。このシミュレーションで用いたのが、3次元磁場解析プログラムTOSCAであったが、これがなければ、常電導高磁場磁石の開発は覚束なかったに違いない。ともあれ、この磁石の開発成功により、2号機の開発が現実的なものとなった。

この常電導高磁場磁石は、高磁場を発生させるために磁極間隙が極力狭くしてあり(42 mm)、AURORA-1のように主要機器を磁場中に置くことができなくなった。そのため、主磁石は180度偏向磁石2つに分割され、磁石間を真空ダクトで結ぶレーストラック



図2 広島大学 HiSOR

形となったが、このことは、AURORA-1では不可能だった長直線部の設置を可能にした。長直線部を十分な長さにとり、挿入光源の使用を可能にしたのがAURORA-2D、長直線部を極力切り詰め、小型化に重点をおいたのがAURORA-2Sである。ちなみに、'D'や'S'の意味は、集束用の四極磁石がダブルレットであるかシングルレットであるかによる¹⁰⁾。

1997年、広島大学放射光科学研究センター¹¹⁾にHiSORとして建設されたのがAURORA-2Dである。ここでは、2つある長直線部の各々に、直線アンジュレータと楕円偏光アンジュレータが各1台ずつ挿入されている。そのほかにも、偏向磁石からの放射光を取り出すポートがあり、全部で16本のビームラインが設置されている。ここでも、精力的に研究が進められている¹²⁾。

図2に、広島大学放射光科学研究センターにおけるAURORA-2Dの姿を示した。

4. AURORA-2S

S型はD型に比べ、コンパクトにできているため、装置全体を鉛とポリエチレンの放射線遮蔽で覆うことができる。これにより、設置する建屋の負担が大幅に軽減できる。通常の加速器施設では、建屋に装置と同等、あるいは、それ以上の費用が必要とされることを考えると大きな利点である。

現在、弊社田無製造所には、AURORA-2Sが設置されている。当初はこれもD型として建設されたのだが、試験運転で十分に満足いく結果を得た^{13,14)}後、S型に改造され、1997年より運転が開始された。その後、さまざまなR&Dと改造を施し、性能の向上を図ってきた¹⁵⁻²¹⁾。現在、田無製造所のAURORA-2Sの性能としては、蓄積電流500 mA以上、入射・加速時間5分、500 mA時の寿命500分と



図3 弊社田無製造所にある AURORA-2S

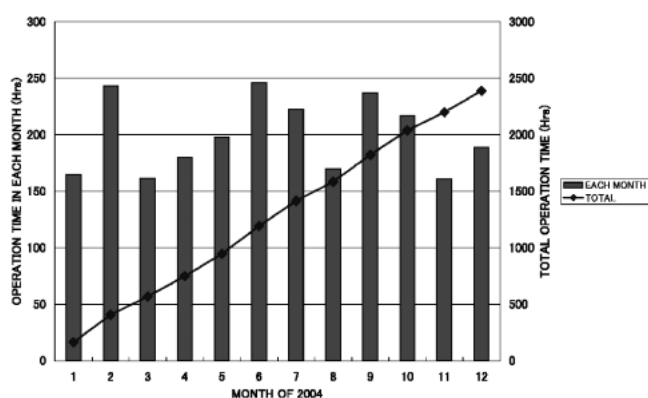


図4 2004年のAURORA-2S運転実績

いったところである。

当社においても、放射光利用の開発研究は活発に進められている。初期のころは、X線リソグラフィーにおいて、顕著な成果²²⁾を挙げていたが、最近では、それ以外にも、LIGAや当社の独自技術であるTIEGATMを中心とした微細加工技術の展開に目覚しいものがある²³⁾。

2002年からは、加工サービスが開始され、AURORA-2Sの運転時間も飛躍的に増えた。図4は、2004年の運転時間を表したものであるが、年間2500時間近くにまで達している。これは、休暇やメンテナンスを除いて、ほぼ、終日運転し続けていることを表している。言い換えるならば、安定度や信頼度が極めて高いことを実証している。

5. まとめ

最後に、AURORA-1, AURORA-2D, AURORA-2Sの主要パラメータを下表にまとめる。

| | AURORA-1 | AURORA-2D (挿入光源なし) | AURORA-2S |
|---------------------------------|----------|-----------------------|-----------|
| エネルギー (MeV) | 575 | 700 | 700 |
| 蓄積電流 (mA) | 300 | 300 | 500 |
| 周長 (m) | 3.14 | 21.95 | 10.97 |
| ハーモニック数 | 2 | 14 | 7 |
| RF周波数 (MHz) | 190.86 | 191.244 | 191.35 |
| エネルギーロス (keV/turn) | 19.34 | 24.42 | 24.42 |
| チューン：水平 | 0.797 | 1.686 | 1.46 |
| ：垂直 | 0.604 | 1.703 | 0.73 |
| ナチュラルエミッタンス (π mm/mrad) | 1.68 | 0.4 | 0.528 |
| 偏向磁場強さ (T) | 3.8 | 2.7 | 2.7 |
| n値 | 0.365 | 0 | 0 |
| QF (T/m) | — | 10.9 | 12.5 |
| QD (T/m) | — | -12.3 | — |

参考文献

- 1) N. Takahashi: NIM, B24/25, p425, (1987).
- 2) 高橋 令幸, 山田 廣成: 住友重機械技報, 第39巻第116号, P2, (1991).
- 3) T. Takayama: NIM, B24/25, p420, (1987).
- 4) 高山 猛 他: 住友重機械技報, 第39巻第116号, P11, (1991).
- 5) 安光直樹, 高橋 誠: 住友重機械技報, 第39巻第116号, p29, (1991).
- 6) T. Mitsuhashi, et al.: 11th Symp. on Accel. Sci. and Tech., p441, (1997).
- 7) T. Hori, et al.: PAC '91, p2877, (1991).
- 8) <http://www.ritsumei.ac.jp/acd/re/src/index.htm>
- 9) Ritsumeikan University: MEMOIRS OF THE SR CENTER, No. 7, (2005).
- 10) T. Hori and T. Takayama: 4th Int'l Conf. On SR sources & 2nd Asian Forum on SR, p148, (1995).
- 11) <http://www.hsrc.hiroshima-u.ac.jp/index.html>
- 12) HiSOR Activity Report, April 2000-March 2001, (2001).
- 13) T. Hori and T. Takayama: APAC '98, p710, (1998).
- 14) T. Hori, et al.: EPAC '98, p583, (1998).
- 15) T. Hori, et al.: EPAC '98, p2413, (1998).
- 16) H. Miyade, et al.: PAC '99, p2405, (1999).
- 17) H. Miyade, et al.: 1st Symp. on Accel. and Rel. Tech., p49, (1998).
- 18) H. Miyade, et al.: 12th Symp. on Accel. Sci. and Tech., p382, (1999).
- 19) H. Miyade, et al.: XEL2000, Nov. 2000, (2000).
- 20) D. Amano, et al.: EPAC2000, p604, (2000).
- 21) T. Hori and T. Takayama: EPAC2000, p628, (2000).
- 22) S. Hirose, et al.: EIPBN2000, (2000).
- 23) T. Katoh: 9th Hiroshima Int'l Symp on SR, p219, (2005).