

SAGA-LS 型超伝導ウィグラーの開発と現状

江田 茂、岩崎能尊、高林雄一、金安達夫
九州シンクロトロン光研究センター 加速器グループ

九州シンクロトロン光研究センターの電子蓄積リングでは現在 SAGA-LS 型ともいえるユニークな超伝導ウィグラーが 2 台運転されている。もともと超伝導ウィグラーは、臨界エネルギーの低い中小光源加速器において、臨界エネルギーを大きく向上させる有用な挿入光源と考えられていた。しかし液体ヘリウムを使用する典型的な超伝導ウィグラーは、中小施設では安定運用のための人的経費的負担が大きく、国内の中小放射光施設では過去に様々な試みはあったものの長期定常運用は現実には行われなかった。一方で SAGA-LS は、偏向電磁石光源（磁場強度 1.46T、臨界エネルギー 1.9keV）のみで開所し、その放射光利用の実効的エネルギー上限は 23keV 程度であった。関心の高い中重元素の K 端領域のハード X 線利用が困難であり、またタンパク質 X 線結晶構造解析においては 10keV 領域での強度増大が望まれており、地域の放射光光源としては、臨界エネルギーの向上が大きな課題であった。

このような背景のもと、SAGA-LS 加速器グループでは中小放射光施設における実用性と光源性能のバランスを慎重に検討し、これまでにない超伝導と常伝導の電磁石から成るハイブリッド型ウィグラーの開発を行った。電磁石は 3 極構成で、ビームラインに放射光を提供する超伝導メインポール磁石 1 台と、メインポールによる大きな軌道偏向を補償する前後の常伝導サイドポール磁石 2 台から成る。メインポールの磁場強度は 4T、臨界エネルギーは 5.2keV である。超伝導コイルの冷却には冷凍機を機械的に接続し、冷媒を使用しない伝導冷却方式を採用した[1,2]。

運用中の 2 台のウィグラーは同仕様で日立製作所において製作された。1 台目は佐賀県予算で製作され、2010 年末に県有ビームライン BL7 用として直線部 LS2 に挿入光源 LS2W として設置された。ユーザー運転を避けてコミッショニングを進め、翌 2011 年 11 月から正式に BL7 のユーザー利用が開始された。これまでの光子エネルギーの利用上限の実績は 50keV に達している。2 台目は住友電工専有ビームライン BL16 用光源として住友電工予算で製作され、2015 年夏に直線部 LS5 に LS5W として設置された。同年末からユーザー運転を避けつつコミッショニングを進め、翌 2016 年 7 月から LS2W、LS5W を同時励磁するユーザー運転を開始した[3]。以来現在まで、ユーザー運転における常用光源として運用されており、地域における放射光光源として貴重な高エネルギー X 線を提供し続けている。

[1] S. Koda, Y. Iwasaki, Y. Takabayashi, T. Kaneyasu, T. Semba, T. Yamamoto, Y. Murata, M. Abe, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 21, 32-38 (2011)

[2] 江田茂、岩崎能尊、高林雄一、金安達夫、仙波智行、山本勉、村田幸弘、阿部充志、放射光, 24, 141-151 (2011)

[3] 岩崎能尊、高林雄一、金安達夫、江田茂、第 13 回日本加速器学会プロシーディングス、千葉, 278 (2016)



SAGA-LS型超伝導ウィグラーの開発と現状

九州シンクロtron光研究センター
加速器グループ
江田 茂、岩崎、高林、金安



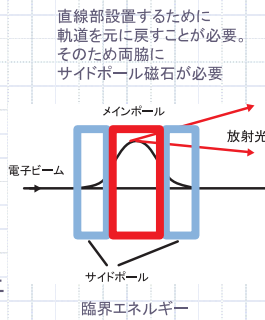
アウトライン

- ◆ SAGA-LSで運用中のユニークな超伝導ウィグラーの開発経緯と現状の紹介



3極超伝導ウィグラー Wave Length Shifterとは

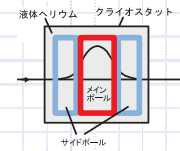
- ◆ 基本的には偏向磁石光源
- ◆ 蓄積リング直線部に設置する挿入光源の一種
 - メインポールとサイドポールから成る
- ◆ 超伝導磁石(>2T)を使用することで臨界エネルギーを常伝導電磁石より高くできる
- ◆ ビームエネルギーの低い中小光源加速器の臨界エネルギー向上に有効な技術、だが...



超伝導ウィグラーの実務上の課題

- ◆ 原理的には、中小施設に有効でも現実には維持は大変
- ◆ 典型的な超伝導ウィグラーでは全ての磁極、コイルを液体ヘリウムに漬ける
 - 液体ヘリウム冷却系維持の負担

- ◆ コスト
 - 冷凍機設置、維持コスト
 - 寒剤コスト
- ◆ 大きなダウンタイム
 - 極低温への冷却時間、常温への昇温時間



磁場の決定 現実的なウィグラーのデザインにあたって

- ◆ 強い磁場
 - より高エネルギーなX線の発生
 - ◆ 弱い磁場
 - ビームへの影響を抑える(ビーム軌道、エミッタンス等)
 - 他BLへの影響を抑える
 - 安定な加速器運転
- ↑ ↓
トレードオフ



実用性と磁場強度の妥協4T

ウィグラー光の臨界エネルギーは磁場に比例する

$$\epsilon_c [\text{keV}] = 0.666 B [\text{T}] E^2 [\text{GeV}]$$

利用限界光子エネルギー ϵ_u

$$\epsilon_u \approx 10 \epsilon_c$$

利用側の要求

20keV (~BL15の上限) 以上

↓
B=4T

$$\epsilon_c = 5.2 \text{ keV}$$

$$\epsilon_u \approx 52 \text{ KeV}$$

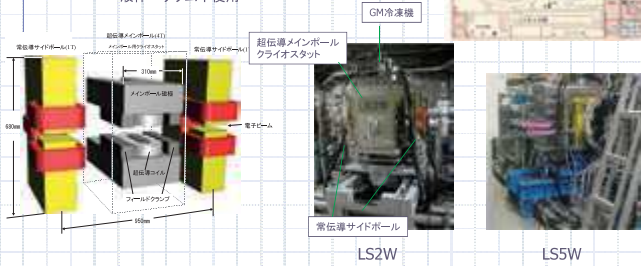
SAGA-LS型ウィグラーLS2W,LS5W

◆ ハイブリッド型3極超伝導ウィグラー

- 超伝導メインポール(4T)+常伝導サイドポール(1T)

◆ 伝導冷却方式

- GM冷凍機による直接冷却
 - 液体ヘリウム不使用



仕様

超伝導メインポール		常伝導サイドポール	
磁場	4T	磁場	0.97 T
線材	Nb Ti/Cu	磁極	純鉄
磁極	純鉄	磁極間ギャップ	36 mm
磁極間ギャップ	82 mm	起磁力	225 kAT
起磁力	450 kAT	電流密度	9.8 A/mm ²
定格電流	176.5 A		
コイル内最大磁場	6.1 T		
臨界温度@定格時	6.7 K		
コイル蓄積エネルギー	50.5 kJ		
コイル巻数	2549 回/pole		
平均電流密度	144.6 A/mm ²		
冷凍機			
型式	SRDK-415D		
冷凍能力 第1ステージ	45W(50K/60Hz)		
第2ステージ	1.5W(4.2K/60Hz)		
第1ステージ(80 K)	1.85 W	第2ステージ(4 K)	0.03 W
支持構造	20 W	電流リード(高温超伝導)	0.2 W
電流リード(常伝導)	2.48 W	配管&ベローズ	0.13 W
配管&ベローズ	0.23 W	配線	0.02 W
配線	4.8 W	輻射	0.074 W
輻射	28.4 W	計	0.454 W
計			

S. Koda, Y. Iwazaki, Y. Takahayashi, T. Kawasumi, T. Samba, T. Yamamoto, Y. Maruta and M. Abe, "Design of a Superconducting Wiggler for the SAGA Light Source Storage Ring", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 21, 32 (2011).

メインポール



SAGA-LS型のメリット

◆ メインポールのみ超伝導としたことで極低温冷却系の冷却負荷減少

- クライオスタット体積の大幅減少
- 熱進入経路である電流リード数半減

GM冷凍機1台での直接冷却で極低温(～4K)維持可能に

→液体ヘリウム系不要 ↓
中小放射光施設における現実的なウィグラー運用の実現

SAGA-LS型ウィグラーの実現

◆ 基本デザイン、要求仕様、立上調整、運用

- SAGA-LS加速器グループ

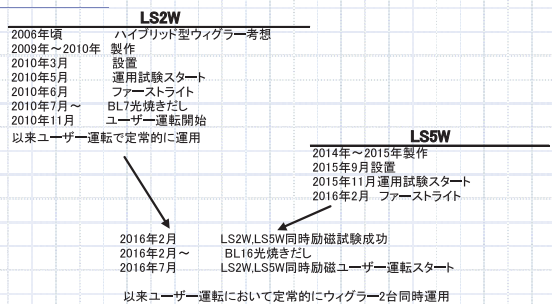
◆ ウィグラー本体設計製作設置

- 日立製作所

◆ 予算

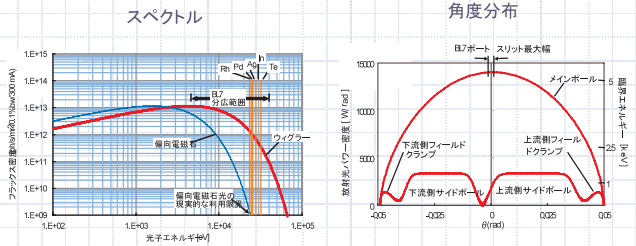
- LS2W(BL07) 佐賀県
- LS5W(BL16) 住友電工

超伝導ウィグラー2台運用に至る歴史



シンクロtron光源における超伝導電磁石技術
名古屋大学 2006年3月9日

光源の性能、性質



BL07 50keV利用の試み JASRI隅谷氏提供

Diffraction Enhanced Imaging (DEI)による 位相イメージングへの適用

DEI実験配置: Sample, Si(111) crystal, CCD camera or PILATUS, Si(220)

サンプルにチップ (RS-232Cインターフェース)

得られたDEI像

A点でのロッキングカーブ

高エネルギーX線の性能評価

エネルギー確認: Eu X線吸収端のXANES測定

50 keVにおけるX線分布

50 keV前後のX線が利用可能であることを確認した。

30 keVでは特に原子の中心のワイヤやポンディング部などで透過強度が強く明確に観察できないが、40 keV以上では屈折による角度のずれが明確に観察されている。一方、50 keVでも像は得られるものの、入射角が小さいため測定に時間がかかり、像もやや不明瞭になっている。

位相イメージングはX線の吸収によらずに撮像するため、高エネルギーX線を有効に利用できる。

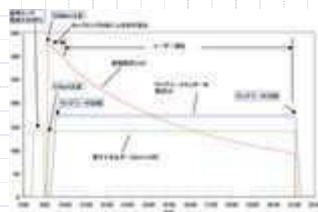
隅谷氏提供、河本正秀、岡島敏浩、SAGA-S BL07のイメージング実験における高エネルギーX線の利用、第28回日本放射光学会、2015年1月11日 11P046

日々のオペレーション



- 運転開始時
 - 257MeV入射
 - 1.4GeV加速 (~320mA)
 - ビーム軌道補正
 - アンジュレータ設定
 - ウィグラーLS2W,LS5W 同時励磁スタート
 - 4T励磁完了
 - チューン、クロマティシティ、軌道の補正、ビームサイズ調整
 - ユーザー運転スタート
- 運転終了時
 - 蓄積ビームダンプ
 - スクレーパー、スキュー4 極磁石調整
 - ウィグラーLS2W,LS5W消磁

ユーザー運転時のエネルギー、ビーム電流



2回入射日はこれを繰り返す

まとめ

- ◆ ハイブリッド型のユニークな超伝導ウィグラーを開発
- ◆ 国内唯一、定常的に超伝導ウィグラー2台を運用中
- ◆ 地域において重要中重元素K端をカバーする貴重なハードX線を提供

謝辞



デザイン検討に始まり、製作、運用に至る過程で多くの方々にご協力いただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

- デザイン
 - Hwang氏(NSRRC), 取越氏(放医研当時)、加藤氏(HiSOR/UVSOR)をはじめとする中部シンクロtron光プロジェクト(現あいちシンクロ)、名古屋大学シンクロtron光研究センターの方々、大見氏(KEK)、野上氏(KEK)、土屋氏(KEK)
- 製作
 - 日立製作所仙波氏、阿部氏(当時)、山本氏(当時)をはじめとする関係者の皆様
- コミッショニング
 - 岡島氏、河本氏をはじめとする県有BL07関係者の皆様
 - 山口氏、飯原氏をはじめとする住電BL16関係者の皆様