

クライオアンジュレータの開発

原 徹¹, 田中隆次¹, 白澤克年¹, 備前輝彦², 清家隆光²,
Xavier MARECHAL², 都留理恵子³, 岩城大介³, 北村英男¹

¹独立行政法人理化学研究所播磨研究所 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

²財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

³兵庫県立大学 〒678-1297 兵庫県赤穂郡上郡町 3-2-1

要旨 アンジュレータの短周期化は、基本波エネルギーを上げ、また周期数が増えるため輝度の向上をもたらす。その結果、例えばこれまでウィグラーしか使えなかったエネルギー領域において、アンジュレータの高輝度放射光が利用可能になる。一方で短周期化に伴う磁場減少を補う必要があるため、磁石性能の向上が不可欠な課題となっている。現在超伝導アンジュレータの開発が欧米で盛んに行われているが、我々は永久磁石を150 K程度に冷却することにより磁場性能を上げるといふ、全く新しいアプローチから短周期アンジュレータの開発を進めている。テスト機で得られたデータを含め、このクライオアンジュレータ開発の現状を報告する。

1. はじめに

最近、第3世代放射光施設において短周期アンジュレータの導入が盛んになっている。そのきっかけは、2001年にスイス Paul Scherrer Institut の Swiss Light Source (SLS) に設置した周期長24 mmの真空封止アンジュレータである。このアンジュレータは、当初 SPring-8 が SLS と結んだ研究協力協定に基づき貸与したものであったが、設置した SLS タンパク質構造解析ビームラインが著しい成果を挙げ、その後周期長19 mmのアンジュレータが3台 SLS に導入された^{1,2)}。SLS の成功は、電子ビームエネルギーが2~3 GeV クラスの中規模放射光施設でも、短周期アンジュレータの高次光を使えば10 keV 付近の高輝度 X 線が得られ、従来のウィグラーや偏向電磁石からの放射光に比べはるかに有用であることを証明した^{2,3)}。

短周期アンジュレータ開発において最も重要な点は、いかにして十分な磁場を発生させるかにある。プラナーアンジュレータ光の波長 (λ) はよく知られている

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2n\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (1)$$

$$K \approx 93.4 B_u(T) \lambda_u(m) \quad (2)$$

という式で与えられる (ここで λ_u はアンジュレータ周期長、 γ は電子ビームエネルギーを電子静止エネルギーで割ったもの、 n は高次光次数、 B_u はアンジュレータピーク磁場、 K は偏向定数とよばれるアンジュレータ磁場を表すパラメータ)。放射光の重要な特性である波長可変性

は、磁極間ギャップを変えることにより K を変化させて得られるが、広範囲な波長領域でスペクトルの連続性を保つには1次光と3次光のスペクトルが重なる必要がある。これはギャップを閉め磁場を増大させた時に、(1)式中の K が最大で2以上の値をとらなければならないことを意味する。また、 K が小さいとアンジュレータ光の高次光成分も減少してしまう。ところがアンジュレータの短周期化は、(2)式において周期長 (λ_u) が小さくなるだけでなく、個々の磁石サイズが小さくなるためアンジュレータ磁場 (B_u) の減少をももたらす。これら K の減少を補うために、短周期アンジュレータでは磁極間ギャップを非常に小さくする必要がある。

アンジュレータの短周期化とそれに伴う小ギャップ化は、1990年代はじめ高エネ研で開発された真空封止アンジュレータによって大きく進んだ⁴⁾。従来真空チャンバーの外に置かれていた磁石列を真空チャンバー内に入れることにより、チャンバーによる磁石ギャップの制限をなくし、原理的に電子ビームサイズまでギャップを小さくできるようにしたためである。真空封止アンジュレータは、SPring-8 の標準的な光源として周期長24~32 mmのものが20台以上用いられている他、中小規模放射光施設においても数多く稼働または導入が計画されている^{1,5-8)}。

真空封止アンジュレータの技術は既に確立されたものとなっているが、更に短周期化を推し進めるためには磁石性能の向上が不可欠である。例えば短周期という点では、周期長11 mmの真空封止アンジュレータが Brookhaven National Laboratory の NSLS に設置されたが、ギャップを3.3 mmまで閉めても前述の K は最大0.7程度に限られて

いる⁷⁾。磁石性能向上のための有望な技術の一つは超伝導アンジュレータであり、古くから R & D が行われている^{9,10)}。超伝導技術や材料の進歩はめざましく、超伝導コイルを用いたウィグラーは既に実用化されているが、超伝導アンジュレータとなるとその実用機はいまだに実現されていない。その理由は、蓄積リングに設置した時の放射光や電子ビームによる入熱に対し、十分な冷却能力を得ることが難しいためである。超伝導ウィグラーと異なり、短周期超伝導アンジュレータでは必然的に 3~5 mm 程度の小ギャップを要求されるため、超伝導磁石の間近を通過する電子ビームのイメージカレントによるジュール発熱や、上流の偏向電磁石放射光による入熱が大きくなり、アンジュレータ 1 m 当たり通常数 10 W に達する。一方、超伝導アンジュレータコイルには NbTi や Nb₃Sn が使用されているため、液体ヘリウム温度付近まで冷却しなければならないが、この温度領域では小型冷凍機の冷却能力はせいぜい 2~3 W に限られる。もし入熱を減らすために電子ビームと超伝導磁石の間に断熱層を設けると、その分磁石間ギャップが大きくなり磁場が低下してしまう。また仮に冷却できたとしても、冷却能力に十分な余裕がないと、電子ビーム軌道の変化やピーク電流の増加などにより入熱量が増えた時、クエンチという超伝導磁石特有の不安材料を抱えることになる。

我々は、このような超伝導電磁石による磁場性能の向上とは全く別の新しいアプローチから、短周期アンジュレータの開発を進めている^{11,12)}。現在最も磁場性能に優れた永久磁石である NdFeB 磁石は、既に広くアンジュレータに使用されているが、これを 150 K 程度に冷却すると更にその性能を向上させることができる。本稿では、このクライオアンジュレータの開発の現状について述べる。

2. 低温下における NdFeB 磁石の特性

永久磁石の磁場性能を表す 2 つの重要なパラメータが、残留磁束密度 (B_r) と保磁力 (iH_c) である。 B_r は磁石 M-H カーブの y 切片に対応し磁石が発生できる磁場の大きさを、x 切片に対応する保磁力 (iH_c) は磁石の安定性即ち減磁のしにくさを表す。現在市販されている NdFeB 磁石には様々な種類のものがあるが、 B_r と iH_c の両方を最大化することはできず、Fig. 1 に示すように B_r と iH_c は互いに反比例のような関係にある。アンジュレータの磁場性能からすれば、最も B_r の大きな磁石を選択したいところだが、 iH_c が小さいと電子ビームによる放射線減磁が起きやすくなるため、例えば Fig. 1 の 50BH のような磁石をアンジュレータに使用することはできない¹³⁾。また真空封止アンジュレータの場合、その磁石は、蓄積リングの超高真空に対応させるためのエージングやベーキング時に高温にさらされるため、ある程度 B_r を犠牲にしても iH_c が大きい磁石 (Fig. 1 の 35EH など) を採用する必要がある⁵⁾。

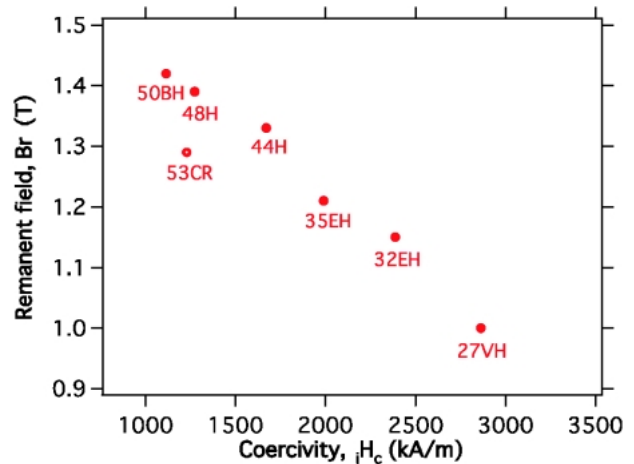


Fig. 1 Coercivity (iH_c) and remanent field (B_r) of commercially available NdFeB and PrFeB magnets. The material codes are those of NdFeB magnets, except 53CR (PrFeB magnet), from NEOMAX Co. Ltd.

ところで、NdFeB 磁石の B_r と iH_c は室温付近で負の温度係数をもつことはよく知られている。即ち、これまで室温ではアンジュレータに使用できなかった高 B_r 磁石も、低温では十分な大きさの iH_c をもつようになり、かつその B_r も室温に比べ増大することが期待できる。これがクライオアンジュレータのコンセプトである。

実際に NdFeB 磁石の低温における B_r と iH_c を測定した結果を、Fig. 2 と 3 に示す。図中の 35EH (NEOMAX 社製 NdFeB 磁石) は、現在真空封止アンジュレータに用いている磁石である。一方 50BH (NEOMAX 社製 NdFeB 磁石) は、 B_r が高いものの室温では保磁力が小さすぎ、放射線減磁やベーキング時の熱減磁が起きる可能性があることから、アンジュレータには使用できなかった磁石である。Fig. 2 の磁石温度に対する B_r の変化を見ると、予想通り温度低下とともに B_r は増加し、150 K 前後で B_r が最大になる。NdFeB 磁石の場合、更に温度を下げると磁化容易方向が c 軸に対して傾きはじめるため B_r が減少する (スピン再配列)。この B_r の変化は、着磁温度以下では温度に対して可逆変化であり再現性がある。一方 iH_c は、Fig. 3 に示すように温度低下に対しほぼ単調増加していることがわかる。現在真空封止アンジュレータに用いられている代表的な磁石である 35EH の室温での iH_c が約 2000 kA/m 程度であるのに対し、150 K 付近の 50BH の iH_c は 3000 kA/m に達しており、低温ではこの高 B_r 磁石が充分安定にアンジュレータに使用できることが期待できる。また 150 K 程度まで冷却すると、磁石からのガス放出は格段に減少するため、クライオアンジュレータの磁石はベーキングなしで超高真空に対応させることができる。

Fig. 2 と 3 中の 53CR (NEOMAX 社製) は、Nd の代わりに Pr を用いた PrFeB 磁石の温度特性である。室温に

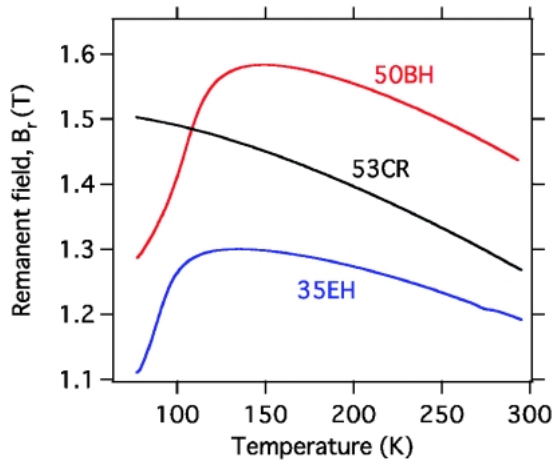


Fig. 2 Measured temperature dependence of remanent fields (B_r) of NdFeB (50BH and 35EH) and PrFeB (53CR) magnets. The material codes are those of NEOMAX Co. Ltd.

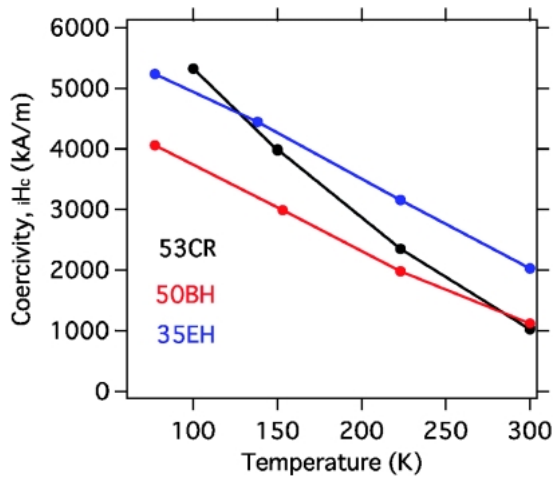


Fig. 3 Measured temperature dependence of coercivity (iH_c) of NdFeB (50BH and 35EH) PrFeB (53CR) magnets. The material codes are those of NEOMAX Co. Ltd.

おける PrFeB 磁石の磁場性能は、NdFeB 磁石に及ばないため現在あまり普及していないが、PrFeB 磁石は NdFeB 磁石のようなスピンの再配列がおきず、液体ヘリウム温度まで B_r が温度低下とともに上昇することが確認されている¹⁴⁾。この PrFeB 磁石は、液体窒素温度付近で超伝導となるバルク高温超伝導体と組み合わせて使用する場合、非常に魅力的な磁石材料であり、新しいタイプの超伝導アンジュレータを実現可能にする¹⁵⁾。従来の超伝導アンジュレータが液体ヘリウム温度付近で動作するのに対し、バルク高温超伝導体アンジュレータは液体窒素温度付近で動作できるため、現在の小型冷凍機で十分な冷却能力が得られる。またループ状バルク超伝導体に流れる永久電流を利用すれば、超伝導コイルの電源が不要になる。このバルク高温超伝導体アンジュレータは、クライオアンジュレータの次世代アンジュレータとして SPring-8 で開発が進められている¹⁵⁾。

3. クライオアンジュレータテスト機

真空封止アンジュレータの磁石列は、既に真空中ではほぼ断熱された状態にあるため、クライオアンジュレータは真空封止アンジュレータのデザインに若干の変更を加えるだけで実現できる^{11,12)}。SPring-8 ではクライオアンジュレータの実証試験を行うため、SPring-8 真空封止アンジュレータと同じ 1.5 m 長架台と真空チャンバーに、高 B_r 磁石である 50BH を使用した周期長 15 mm、長さ 60 cm の磁石列を組み込んだテスト機を開発した。Fig. 4 にクライオアンジュレータテスト機の構造と写真を示す。真空封止アンジュレータと異なるのは、側面に磁石列冷却のための小型冷凍機（クライオクーラー）を取り付け、磁石列を支持するシャフトを中空構造にして内部に断熱材を入れた点だけである。クライオクーラーのヘッドはギャップ駆動に

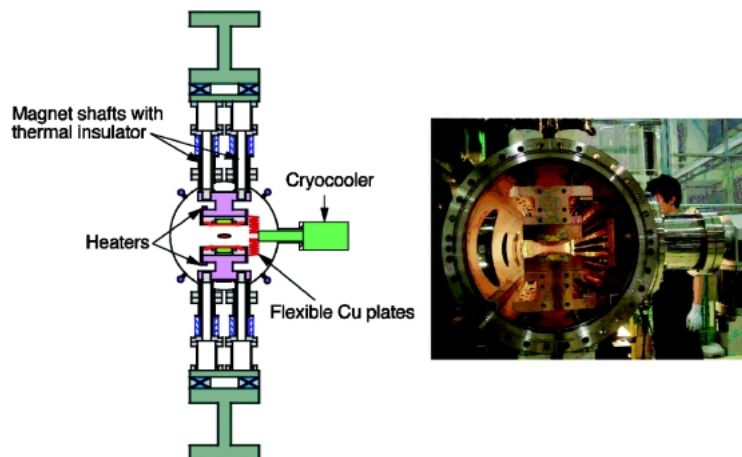


Fig. 4 Prototype cryogenic permanent magnet undulator developed at SPring-8, (left) schematic design and (right) picture of the prototype device. The magnet arrays are a pure magnet Halbach type and 0.6 m long. Its periodic length is 15 mm and 50BH NdFeB magnets are used.

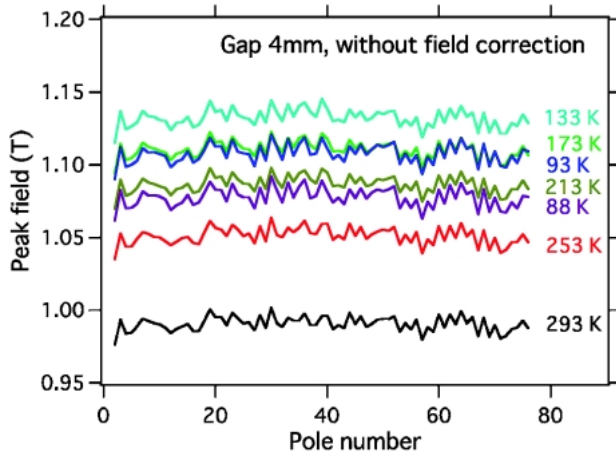


Fig. 5 Measured peak magnetic fields of the prototype cryogenic permanent magnet undulator as a function of the magnet temperature. Peak fields are plotted for each undulator pole.

追従させるため、フレキシブルな蛇腹銅板を介して銅製磁石列ビームに熱接触させている。使用したクライオクーラーは、液体窒素温度付近において1台で約100 Wの冷却能力をもち、テスト機の構成では90 K以下まで磁石列を冷やすことができる。磁石列の温度制御はクライオクーラーだけでは難しいため、磁石ビームにシースヒーターを取り付け、ヒーター出力を調整することにより温度制御を行っている。

テスト機の低温磁場測定は、真空断熱したチャンバー内で行う必要があるため、1 mm厚のホールプローブを、長い棒の先に取り付けベローズを介して真空中に挿入し、ビーム軸方向にスキャンさせて行った。ギャップ中心での各アンジュレータ周期のピーク磁場分布を Fig. 5 に示す。磁場調整は一切行っていない。磁石列支持シャフトや磁石ビームの熱収縮によりギャップが温度によって変化するため、磁石ギャップは静電容量型変位計で直接測定し、常にギャップが4 mmになるように調整しながら各温度で測定を行った。この測定では、長さ約1 mの棒の先にホールプローブを取り付けているため、プローブの位置精度があまりよくないが、Fig. 5 からわかるように、温度による磁場分布の形は平均磁場を除いてほとんど変化していない。

Fig. 5 の測定結果から計算した、フェーズエラーとよばれる磁場の位相誤差をプロットしたものを Fig. 6 に示す。フェーズエラーは高次光輝度に対する重要なパラメータで、フェーズエラーが大きいとアンジュレータ高次光輝度は著しく低下する。例えば電子ビームエネルギーが2.4 GeVのSLSの場合、7~13次光を使用するためフェーズエラーを2°程度に抑えている¹⁾。真空封止アンジュレータは、磁石列間近を電子ビームが通過することから磁極面を平坦にしておく必要がある。このため磁場調整には、鉄片等の磁性体シムを磁極に貼り付けるような方法は採用できず、主に個々の磁石の入れ替えによる調整方法を用いてい

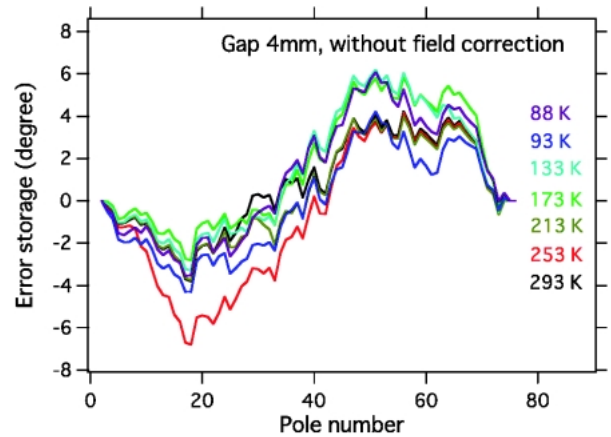


Fig. 6 Phase errors of the measured magnetic fields in Fig. 5.

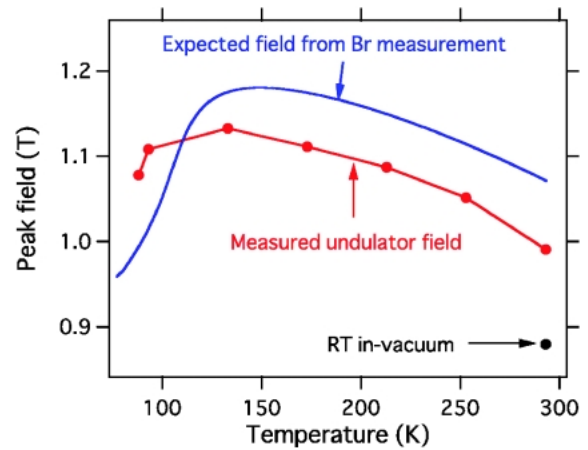


Fig. 7 Average peak fields of the prototype cryogenic undulator. The red markers are measured undulator fields and the blue line shows the expected fields calculated from the results of Fig. 2. The black dot is the peak field of a conventional room temperature in-vacuum undulator.

る¹⁶⁾。クライオアンジュレータの場合、室温での磁石入れ替えと低温での磁場測定を繰り返す必要があるが、一回の温度の上げ下げに一日程度を要してしまうため、温度による誤差磁場の変化は磁場調整作業上の大きな課題であった。しかし Fig. 5 と Fig. 6 を見る限り、誤差磁場の温度変化は少なく、室温で磁場調整を行えば低温における誤差磁場も減少し、調整と測定のための温度サイクルの繰り返しは数回で済むことが期待できる。

Fig. 7 は、実際に測定したテスト機の平均ピーク磁場の温度変化と、Fig. 2 で得られた磁石単体の B_r データから計算した予想平均磁場を比較したものである。Fig. 7 青線の計算は簡単な磁場の線形重ね合わせで行ったため、アンジュレータ磁石列に組んだ時のパーミアンスの効果で、実際のアンジュレータ磁場の方が小さくなっているが、ほぼ予想通りの磁場の増大が確認された。Fig. 7 中に黒点で示した通常室温真空封止アンジュレータ磁場に比べ、ク

ライオアンジュレータの磁場は150 K 付近で約3割増加していることがわかる。

4. クライオアンジュレータの性能

クライオアンジュレータを含め真空封止アンジュレータは、磁石間近を電子ビームが通過するため、磁石の耐放射線特性が非常に重要である。特に短周期真空封止アンジュレータの場合、小さなギャップで運転するため、ガウス分布をした電子ビームの裾野が磁石に当たった時に、磁石が減磁しないことが求められる。NdFeB 磁石の耐放射線特性は、磁石材料の $\mu_0 H_c$ が大きいほど優れていることが知られている¹³⁾。既に Fig. 3 に示したように、クライオアンジュレータ磁石の $\mu_0 H_c$ は室温時の値に比べ3倍以上になっているため、耐放射線特性の向上が期待できる。Fig. 8 は、実際に50BH 磁石に2 GeV の電子ビームを照射し、室温と低温(145 K)における減磁特性を測定したものである¹³⁾。測定の結果は期待通り、クライオアンジュレータが優れた耐放射線特性を有していることを示している。

さて最後に、クライオアンジュレータと超伝導アンジュレータを比較してみる。アンジュレータ周期をどこまで短

くできるかは、磁石の磁場性能とともにアンジュレータギャップをどこまで閉められるかに依存する。真空封止アンジュレータの場合、最小ギャップは、磁石に電子ビームが当たるまで、即ち加速器固有の電子ビームエミッタンスとビーム収束系のベータ関数によって決まる電子ビームサイズに左右される。逆に言うと、同一の磁場を得るためにどこまでギャップを閉めなければならないかという条件は、磁石の磁場性能が高いほど緩和され、ギャップが広いほどより多くの加速器において短周期アンジュレータの導入が可能であることを意味する。ここでは超伝導アンジュレータの例として、現時点で最も進んでいる ACCEL 社が開発したアンジュレータを取り上げる¹⁷⁾。Table 1 は、ACCEL 超伝導アンジュレータのパラメータを元に、周期長14 mm のアンジュレータにおいて、 $K=1.8$ を達成するために必要な磁石ギャップ値を示している。超伝導アンジュレータのギャップが5 mm であるのに対し、従来の室温真空封止アンジュレータでは1.9 mm までギャップを閉めなければ $K=1.8$ が得られない。一方クライオアンジュレータでは、磁石列を永久磁石のみで構成したピュア型の場合、ギャップ3.2 mm で $K=1.8$ が得られる。さらに磁性体を用いたハイブリッド型を採用し、Fig. 9 のようなサイド磁石列をもった磁石列構成にすると、ギャップ条件は4 mm まで緩和される。

Table 1 で示したように、単純に比較するとクライオア

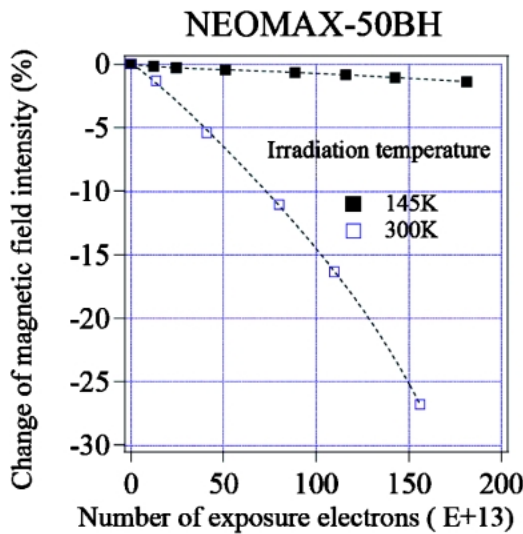


Fig. 8 Magnetic field change of 50BH NdFeB magnet as a function of electron beam dose measured at the temperatures of 300 K and 145 K¹³⁾. The electron beam energy is 2 GeV.

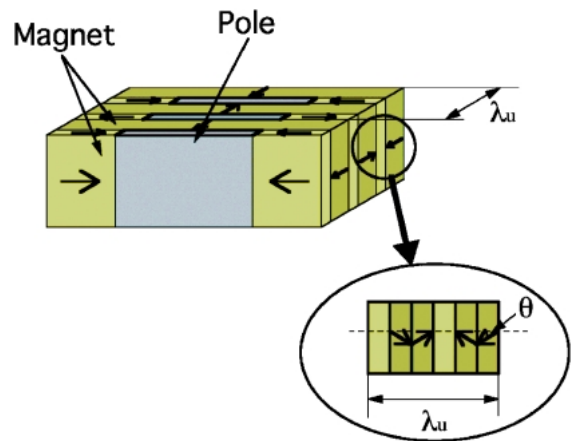


Fig. 9 Magnet configuration of the cryogenic hybrid undulator used for the estimation in Table 1.

Table 1 Comparison of the magnetic gaps between the superconductive undulator¹⁷⁾, room temperature in-vacuum undulator and cryogenic undulators under the conditions of $K=1.8$ and 14 mm undulator period.

	ACCEL superconductive undulator ¹⁷⁾	R.T. in-vacuum undulator (Br=1.19 T)	Cryogenic pure magnet undulator (Br=1.58 T)	Cryogenic hybrid undulator (Fig. 9 with $\theta=20^\circ$) (Br=1.58 T)
K parameter	1.8			
Magnetic gap (mm)	5	1.9	3.2	4.0

ンジュレータの磁場性能は超伝導アンジュレータに及ばない。しかしながら、超伝導アンジュレータの動作温度である液体ヘリウム温度付近では冷凍機の冷却能力が小さく、クエンチを防ぐために熱絶縁層を電子ビームと磁石の間に設けると、その実効的な磁場性能は大きく下がってしまう。Table 1のクライオアンジュレータのギャップは、そのまま電子ビームに対する物理的な開口となっているのに対し、この熱絶縁層の厚さが上下磁石列で1 mmを超えると、超伝導アンジュレータはその優位性を失ってしまう。

超伝導アンジュレータは、将来的に見て短周期アンジュレータの有望な候補ではあるが、現時点では技術的に解決しなければならない問題が多い。一方クライオアンジュレータは、技術的に困難な問題はなく、その実現可能性において超伝導アンジュレータよりも優れている。

5. まとめ

最近世界各地で稼働または建設計画が進んでいる中規模第3世代放射光施設にとって、短周期アンジュレータは高輝度X線が得られるという点で魅力的な光源である。またLINACベースのX線FEL施設においても、アンジュレータ周期長が短くなれば電子ビームエネルギーを下げることができ、施設全体をコンパクト化できるため、建設コストを削減することができる^{18,19)}。

クライオアンジュレータは、超伝導アンジュレータとは全く別のアプローチからアンジュレータを短周期化できる技術であり、技術的に確立された真空封止アンジュレータに若干の修正を加えるだけで実現できる。また、動作温度が高いため電子ビーム等からの入熱に対し十分な冷却能力を有し、原理的にクエンチの心配もない。さらに磁場調整においても、従来の永久磁石アンジュレータで確立された手法がそのまま適用できる利点がある。

SPring-8ではクライオアンジュレータのテスト機を製作し、その磁場性能を実証した。今後は、実際に蓄積リングへの設置を目指した実用機の開発を進めていく予定である。クライオアンジュレータは、蓄積リングベースの放射光施設だけでなく、ERLやX線FEL用アンジュレータとしても将来有望な光源である。

参考文献

- 1) T. Schmidt, G. Ingold, A. Imhof, B. D. Patterson, L. Patthey, C. Quitmann, C. Schulze-Briese and R. Abela: Nucl. Instr. and Meth., vol. A467-468, 126 (2001).
- 2) <http://sls.web.psi.ch/view.php/beamlines/px/research/index.html>
- 3) H. Kitamura: J. Synchrotron Rad., vol. 7, 121 (2000).
- 4) S. Yamamoto, T. Shioya, M. Hara, H. Kitamura, X. W. Zhang, T. Mochizuki, H. Sugiyama and M. Ando: Rev. Sci. Instrum., vol. 63, 400 (1992).
- 5) T. Hara, T. Tanaka, T. Tanabe, X. M. Maréchal, S. Okada and H. Kitamura: J. Synchrotron Rad.: vol. 5, 403 (1998).
- 6) A. Mochihashi, M. Katoh, M. Hosaka, K. Hayashi, J. Yamazaki, Y. Takashima, Y. Hori, H. Kitamura, T. Hara and T. Tanaka: Proceedings of 8th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, August 25-29 2003, San Francisco, U.S., 259 (2004).
- 7) P. M. Stefan, T. Tanabe, S. Krinsky, G. Rakowsky, L. Solomon and H. Kitamura: J. Synchrotron Rad., vol. 5, 417 (1998).
- 8) S. Yamamoto, K. Tsuchiya and T. Shioya: Proceedings of 8th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, August 25-29 2003, San Francisco, U.S., 235 (2004).
- 9) M. Bazin, Y. Farge, M. Lemonnier, J. Perot and Y. Petroff: Nucl. Instr. and Meth., vol. 172, 61 (1980).
- 10) G. Ingold, I. Ben-Zvi, L. Solomon and M. Woodle: Nucl. Instr. and Meth., vol. A375, 451 (1996).
- 11) T. Hara, T. Tanaka, H. Kitamura, T. Bizen, X. Marechal, T. Seike, T. Kohda and Y. Matsuura: Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol. 7, 050702 (2004).
- 12) H. Kitamura, T. Hara, X. Marechal, T. Tanaka, T. Bizen and T. Seike: Proceedings of European Accelerator Conference, September 2004, Lucern, Switzerland, 59 (2004).
- 13) T. Bizen, X. Marechal, T. Seike, H. Kitamura, T. Hara, Y. Asano, D. E. Kim and H. S. Lee: Proceedings of European Accelerator Conference, September 2004, Lucern, Switzerland, 2089 (2004).
- 14) NEOMAX Co., Ltd.: Private communications.
- 15) T. Tanaka, T. Hara, H. Kitamura, R. Tsuru, T. Bizen, X. Marechal and T. Seike: Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol. 7, 090704 (2004).
- 16) T. Tanaka, T. Seike and H. Kitamura: Nucl. Instr. and Meth., vol. A465, 600 (2001).
- 17) S. Kubsy, D. Dolling, A. Geisler, A. Hobl, U. Klein, D. Krischel, H. O. Moser, R. Rossmannith and S. Chouhan: Proceedings of 8th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, August 25-29 2003, San Francisco, U.S., 223 (2004).
- 18) T. Shintake, H. Matsumoto, T. Ishikawa and H. Kitamura: "The SPring-8 Compact SASE Source", Proc. of the SPIE's 46th Annual Meeting, San Diego, USA, June 2001.
- 19) <http://www-xfel.spring8.or.jp/index.htm>

● 著者紹介 ●



原 徹

独立行政法人理化学研究所
北村X線超放射研究室 前任研究員
E-mail: toru@spring-8.or.jp
専門: 挿入光源

【略歴】

パリ第11大学博士課程修了後、1995年9月理化学研究所入所。SPring-8挿入光源の開発に従事し、最近X線自由電子レーザーの建設に参加、現在に至る。

Development of cryogenic permanent magnet undulator

Toru HARA¹, Takashi TANAKA¹, Katsutoshi SHIRASAWA¹,
Teruhiko BIZEN², Takamitsu SEIKE², Xavier MARECHAL²,
Rieko TSURU³, Daisuke IWAKI³, Hideo KITAMURA¹

¹RIKEN, Harima Institute/SPring-8 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo-ken, 679-5148, Japan

²Japan Synchrotron Radiation Research Institute/SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo-ken, 679-5148, Japan

³University of Hyogo 3-2-1, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo-ken, 678-1297, Japan

Abstract A short period undulator increases not only the photon energy of undulator radiation, but also the brilliance due to its increased number of undulator periods. As a result, brilliant undulator radiation becomes available in the photon energy range, which is currently covered by wigglers. In order to develop a short period undulator, high performance magnets are indispensable and superconductive undulators have been actively investigated in recent years. In this paper, however, we propose a new approach, so called a cryogenic permanent magnet undulator using NdFeB magnets at the temperatures around 150 K. The current status of this cryogenic permanent magnet undulator development at SPring-8 is presented including the results of the magnetic field measurements on a prototype undulator.
