



三菱電機の超電導小型SRリング

山田 忠利

三菱電機株式会社 中央研究所

A Superconducting Compact SR Ring in Mitsubishi Electric

Tadatoshi YAMADA

Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation

A superconducting compact SR ring was constructed and is now under beam commissioning.

Design parameters of this compact SR ring are as follows. Beam energy is 800 MeV, current is 220mA, critical wave length is 0.65 nm, radiation power is 50 mW/mrad²/nm, circumference is 9.2 m.

Superconducting bending magnets, which have many merits, was constructed and tested. They are operated in persistent current mode. The magnetic fields of the superconducting bending magnets are very stable and the decay ratio is less than 2×10^{-11} /h. Iron magnetic shields are installed in superconducting bending magnets. Helium consumption of the bending magnets is very small.

The superconducting compact SR ring is going to be used for the study of SR lithography of ULSI and ultra fine analysis of material.

1. はじめに

産業用の装置としての実用的な特長を備えた、超電導電磁石を用いた小型のSRリングを建設した。その内容を紹介する。

現在、超電導小型SRリングのビーム調整を行っている。調整は極めて順調に進んでいる。SR光源として、間もなく毎日の定常運転を行なう予定

である。

我々が超電導小型SRリングを開発する目的は次の2つである。

- ・SR装置技術を開発する。更に、高エネルギービームの計測・制御技術を開発する。
- ・超LSIのSR転写技術の開発や原子レベルの材料解析などの研究にSR光を供給する。

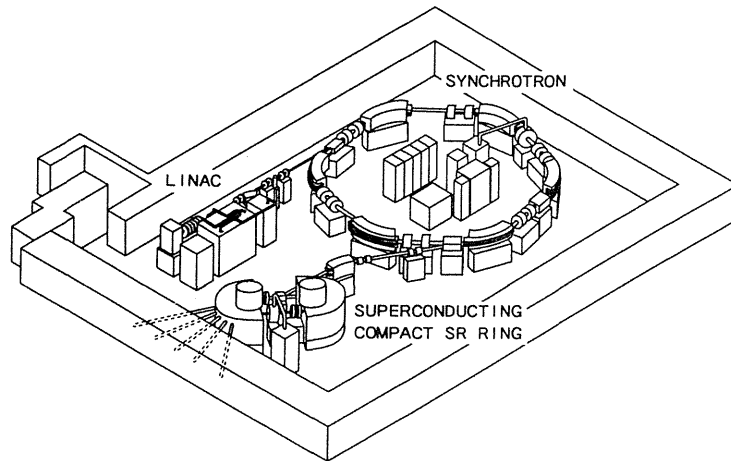


Fig.1 The compact synchrotron radiation facility.

2. 超電導小型SRリング

超電導小型SRリングの概要を図と表で紹介する¹⁾。

超電導小型SRリングおよびビーム入射器であるシンクロトロンとライナックの鳥瞰図を図1に示す。また、シンクロトロン側から撮影したSRリングの写真を図2に示す。表1は小型SRリングの設計パラメータをまとめたものである。SR光のスペクトルを図3に示す。

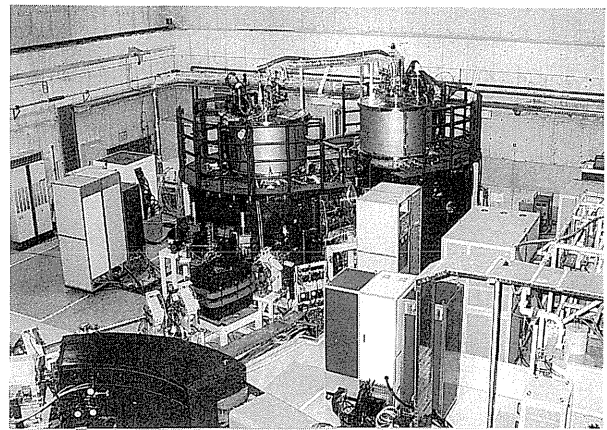


Fig.2 The superconducting compact SR ring.

2.1 特長

この超電導小型SRリングは研究用ではあるが、産業用の装置として設計した小型SRリングであり、次の特長を有している。

- ・ビームエネルギーは800MeVである。SR光のピーク波長は2.7オングストロームであり、この小型SRリングはSR転写技術の研究やXAFSによる材料解析などの研究に適する。
- ・この超電導小型SRリングはレーストラック形である。軌道周長は9.2mであり、レーストラック形では最も小さい。
- ・超電導小型SRリングを構成する2台の超電導電磁石の液体ヘリウムの消費量を小さく設計しており、専用のヘリウム液化機は不要である。
- ・超電導電磁石は永久電流という方式で運転され

る。この方式では、電磁石が発生する磁界はほとんど減衰しない。この電磁石では磁界の減衰率は $2 \times 10^{-11}/h$ 以下と推定されている。

- ・また、この方式では、最初に超電導磁石に電流を流し込んだ後、電磁石電源は切り離される。従って、連続運転中は超電導電磁石を励磁する電力は要らない。
- ・超電導電磁石には磁気遮蔽が設置されており、超電導小型リングから数m離れると、漏れ磁界は地磁気並みに減少する。このため、この小型SRリングの近くで、磁界を嫌う電子機器を使うことができる。

Table 1 Design parameters of the superconducting compact SR ring.

Beam energy		800 MeV
Beam current		220 mA
Lifetime		≥ 4 hr
Critical wave length		0.65 nm
Radiation power at 1 nm		500 mW / nm / mrad ²
Circumference		9.2 m
Bending field		4.5 T
Field index n		0.16
Bending radius		0.593 m
Strength of quadrupole	K_f	4.7 m ⁻²
Radiation loss		56 keV / turn
Acceleration frequency		130 MHz
RF voltage		120 keV
Harmonic number		4
Tune	ν_x	1.38
	ν_y	0.43
Natural emittance		1.2 π mm mrad
Coupling factor	κ	0.1
Energy dispersion		0.079%
Momentum compaction		0.307
Chromaticity	ξ_x	-0.92
	ξ_y	-0.69
Beam size at the center of the bending magnet	σ_x	0.7 mm
	σ_y	0.9 mm
Bunch length	σ_z	69.3 mm
Damping time	τ_x	1.7 ms

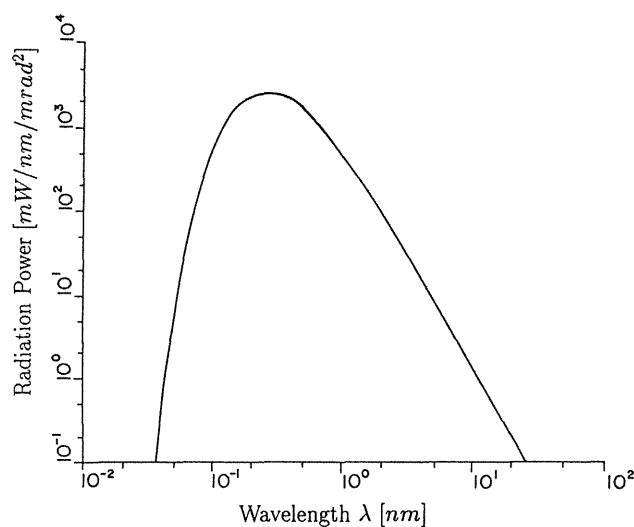


Fig. 3 Spectrum of synchrotron radiation from the superconducting compact SR ring.

2.2 構成

超電導小型SRリングの構成を図4に示す。超電導偏向電磁石がつくる偏向磁界に勾配を持たせ (n 値を持たせ) ることによって、直線部の4極電磁石の台数を2台に減らした。また、バンプ軌道を作るためのキッカー電磁石も1台にした。このような工夫によって、電子ビームの軌道周長は9.2m というレーストラック形では最も小さな値に設計することができた。

また、小型SRリングの設計の精度を上げるために、電子ビーム軌道の計算機シミュレーションコードを開発した²⁾。これを活用して、小型SRリングのラティスに問題がないことを確認すると共に、超電導偏向電磁石の均一磁界領域およびビームチェンバーの断面の大きさを決定した。

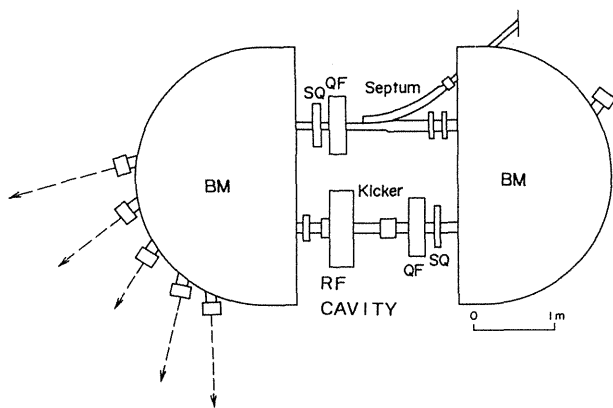


Fig.4 Layout of the superconducting compact SR ring.

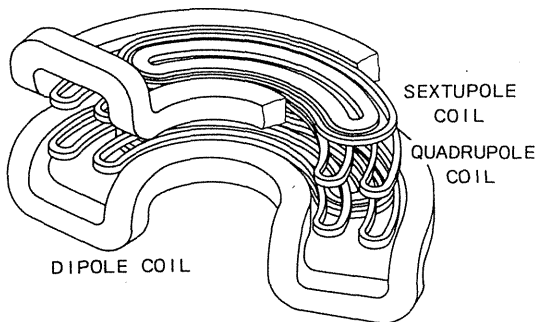


Fig.5 Schematic of the superconducting bending magnet coils.

3. 超電導偏向電磁石³⁾

超電導偏向電磁石のコイルの形状を図5に示す。超電導偏向電磁石はそれぞれ上下で対になった2極コイル、4極コイル、6極コイルから構成されている。上下の中央の面に室温のビームチェンバーが設置されている。なお、ビームチェンバーの温度を室温にした理由は、これまでに確立している超高真空技術を利用するためである。2極コイルの端部は互いに離れるように折り曲げられた形状である。これは、2極コイル端部付近のビームチェンバー内の磁界均一度をよくするためである。4極コイルは偏向磁界に勾配を持たすために使用される。また、4極コイルと6極コイルは偏向磁界の均一度を改善するための補正コイルとして用いられる。

図6に完成した超電導偏向電磁石の外観を示す。電磁石の上部の円筒部分は液体ヘリウム槽である。その下に見えているのは鉄製の磁気遮蔽体

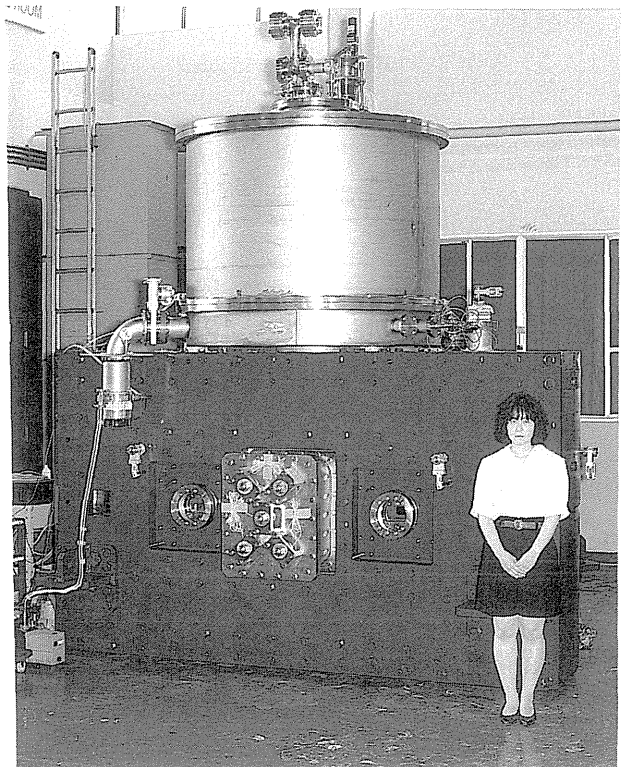


Fig.6 A superconducting bending magnet.

Table 2 Design parameters of the superconducting bending magnet.

Bending field	4.5 T
Bending angle	180 degree
Bending radius	0.593 m
Homogenous field area	
horizontal	$x = \pm 40$ mm
vertical	$y = \pm 20$ mm
Stored Energy	7.6 MJ/magnet
Inductance	68.4 H
Magnetic shield	warm iron
Beam chamber	warm

である。もれ磁界の遮蔽体を設置しているから、偏向電磁石から数m離れるともれ磁界の大きさは地磁気程度になる。従って、超電導小型SRリングから数m離れた位置に、磁界を嫌うリニアックの電子銃を設置しても特に問題にはならない。

超電導偏向電磁石の設計パラメータを表2にまとめた。

超電導偏向電磁石の発生磁界分布や電磁力、永久電流の減衰率は設計値に近い値であることを確認した。液体ヘリウムの消費量は小さく、超電導偏向電磁石の運転の事は忘れて小型SRリングのビーム調整に専念できる。

4. ビーム入射器

小型SRリングへのビーム入射器はリニアック+シンクロトロンである。この設備は既に完成しており、1GeV、60mAまでのビーム加速に成功している^{4), 5)}。リニアックのビームエネルギーは20MeVである。シンクロトロンのビームエネルギーは最高1GeVであり、20MeVから1GeVの間の任意の値に設定できる。

シンクロトロンのパラメータを表3に、リニアックのパラメータを表4にまとめた。また、シンクロトロンの写真を図7に示す。

このビーム入射器を用いることによって、超電

導小型SRリングにフルエネルギー入射できるから、蓄積電子ビームの減衰分を絶えず補給して、蓄積電子ビームを一定値に保つことができる。即ち、SR光の利用者に一定強度のSR光を連続して供給することができる。

なお、リニアック+シンクロトロンは高エネルギービーム実験設備であって、高エネルギービームの計測や制御の基礎技術の開発や高エネルギー電子ビームの応用研究に用いるものである。

5. あとがき

超電導小型SRリングの建設が完了した。ビーム調整は順調に進んでいる。超電導小型SRリングの開発によって、産業用の超電導小型SRリングの設計・製作およびビーム調整技術を確立することができた。

今後は、超LSIのSR転写技術や材料の原子レベルの解析の研究などSR利用の研究にSR光を供給する。

Table 3 Parameters of the synchrotron.

Beam energy		1 GeV (max)
Injection energy		20 MeV
Repetition		2 Hz
Circumference		34.6 m
Bending field		1.5 T
Bending radius		2.22 m
Strength of quadrupole	K_f	2.39 m^{-2}
	K_d	2.12 m^{-2}
Radiation loss		40 keV / turn
Acceleration frequency		130 MHz
RF voltage		100 kV
Harmonic number		15
Tune	ν_x	2.23
	ν_y	1.21
Natural emittance		$0.405 \pi \text{ mm mrad}$
Coupling factor	κ	0.1
Energy dispersion		0.053 %
Momentum compaction		0.146
Beam size	$\sigma_{x\text{max}}$	1.7 mm
	$\sigma_{x\text{min}}$	0.9 mm
	$\sigma_{y\text{max}}$	0.6 mm
	$\sigma_{y\text{min}}$	0.3 mm
Bunch length	σ_z	76.9 mm
Damping time	τ_x	9.1 ms

Table 4 Parameters of the linac.

Beam energy	20 MeV
Beam current	100 mA
Pulse width	$2.5 \mu \text{ s}$
Repetition	2 Hz (max)
Energy spread	$\pm 0.5 \%$
Emittance	$1.3 \pi \text{ mm mrad}$
Tube length	1.6 m
Acceleration frequency	2.856 GHz

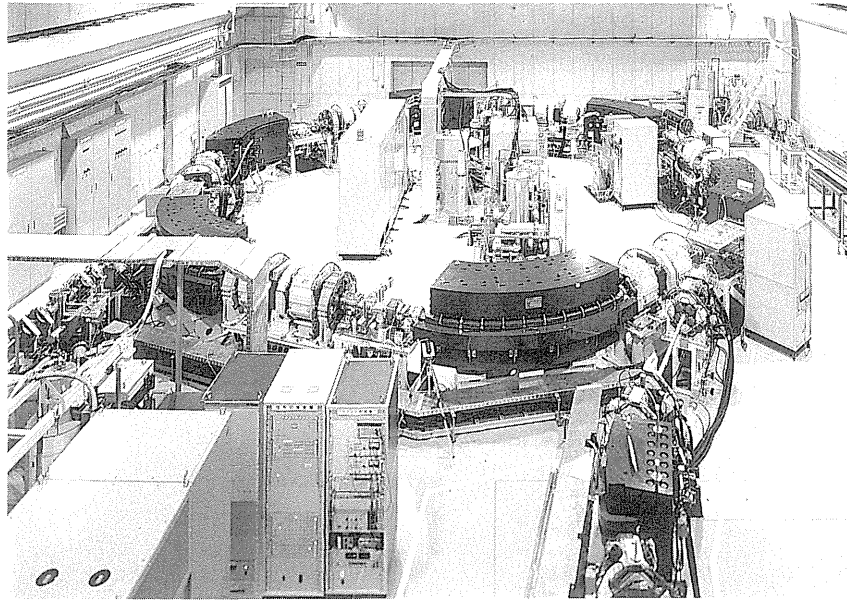


Fig.7 1 GeV synchrotron.

文献

- 1) T. Nakanishi, S. Okuda, K. Ikegami, T. Matsuda, T. Nakagawa, S. Nakamura, S. Nakata, H. Tanaka, C. Tsukishima, S. Yamamoto, T. Yamada, and M. Iwamoto. *Rev. Sci. Instrum.* **63** (1), 770, (1992).
- 2) H. Tanaka and T. Nakanishi, *Rev. Sci. Instrum.* **63** (1), 777 (1992).
- 3) S. Yamamoto, T. Kawaguchi, T. Matsuda, T. Takeuchi, I. Kodera, T. Amano, M. Morita, S. Yokoyama, K. Shimohata, S. Nakamura, T. Yamada, and M. Iwamoto, *IEEE Transactions on Magnetics*, **3**, (1), 821 (1993).
- 4) T. Nakanishi, S. Okuda, K. Ikegami, S. Nakata, T. Nakagawa, C. Tsukishima, A. Maruyama, H. Tanaka, S. Nakamura, I. Kodera, S. Yamamoto, T. Matsuda, and T. Yamada, *The 8th Symp. on Accelerator Science and Technology*, p.49 (1991) Saitama, Japan.
- 5) 中西哲也, 奥田荘一郎, 中村史郎, 山田忠利, 岩本雅民, *三菱電機技報*, **65** (11), 28 (1991).

