

## 中部シンクロトロン光利用施設（仮称）計画

高嶋圭史<sup>1,2</sup>, 加藤政博<sup>3,1</sup>, 渡邊信久<sup>1,2</sup>, 保坂将人<sup>1,2</sup>,  
竹田美和<sup>1,2</sup>, 山根 隆<sup>2</sup>, 曾田一雄<sup>2</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学小型シンクロトロン光研究センター 〒464-8603 名古屋市千種区不老町

<sup>2</sup>名古屋大学大学院工学研究科 〒464-8603 名古屋市千種区不老町

<sup>3</sup>分子科学研究所極端紫外光研究施設 〒444-8585 岡崎市明大寺町字西郷中38

**要旨** 名古屋大学では、平成3年よりX線利用を主な目的とした比較的小型のシンクロトロン光施設建設の計画を進めてきた。平成15年からは、愛知県の進める「知の拠点」計画の主要施設の一つとして、愛知県や中部地区の大学、研究所、産業界と協力して計画の具体化のために検討を行っている。これまでの計画の経緯や、予定している光源加速器、ビームラインについて報告する。

### 1. はじめに

名古屋大学のシンクロトロン光施設建設計画は、平成3年に築島隆繁先生、原田仁平先生、早川幸男学長（当時）間で検討を開始されたことが事の始まりである<sup>1)</sup>。その後平成6年1月に水谷字一郎先生と本稿の著者の一人である竹田の二人を世話人としてNSSR (Nagoya University Small Synchrotron Radiation Facility) 設置促進委員会が発足した。名古屋大学のシンクロトロン光ユーザーには工学研究科所属の方が多くこともあり、当初より、硬X線が使える小型のシンクロトロン光施設によって、工学・産業界への応用を促進することを表明していた。この計画は、さらに、シンクロトロン光施設を中心として、周辺装置や研究・実験支援までを含む「光科学ナノファクトリー」構想へと発展してきた。

光科学ナノファクトリー構想は、「ものづくり」を念頭に置いた計測・分析拠点として、シンクロトロン光施設を中心に周辺装置、支援組織、産学連携組織を備えた施設の実現を目指している。その中で光源加速器には最先端の性能を求めるといよりも、むしろビームラインの配置やエンドステーションとその周辺装置に大きな特徴を持った施設として計画をすすめてきた。すなわち、クリーンルームや、ガス雰囲気中・有機溶媒中・電磁場環境中などの実使用環境下にある試料の測定や観察を行うための周辺装置や設備を建設当初より備えること、SEM, TEM, X線装置等の各種高レベルの分析装置を配置することで通常の実験室ではできないレベルの多面的な計測や分析を行い、一連の研究がこの施設内で完結できることを想定していた。また、ハード面だけでなくソフト面についても、小型である

ことを利用して、たとえば試行錯誤を繰り返しながらの長期的研究・開発が可能な柔軟性のある利用方法や運営体制の可能性を検討してきた。ソフト面を充実させることは、従来シンクロトロン光が使用されてきた先端的研究だけでなく、産業界との連携を進め、潜在的なユーザーを掘り起こし、利用者と利用分野を広げることに繋がる。

一方、愛知県では、地域の科学技術振興策としての「科学技術交流センター」構想の強化のため、平成15年に行われた構想の見直しに際して、シンクロトロン光施設を構想の目玉として導入することの検討を開始した。この結果、次世代ものづくり技術の創造・発信を図る「知の拠点」計画として、ナノテクノロジー、IT、バイオテクノロジーを基盤技術とした研究開発・応用への取り組みへと展開してきた。名古屋大学が提案してきた光科学ナノファクトリー構想は、これらの分野に多角的な計測分析データを提供できるものであり、産業界からの要望に応える地域共同利用施設として、「知の拠点」に最適な施設として期待されている。このため、現在、愛知県、産業界、大学、研究機関が連携してシンクロトロン光施設計画実現のための活動を行っている。

今年4月には名古屋大学に全学附属施設としての「小型シンクロトロン光研究センター」が発足した<sup>1)</sup>。センターは、光源部門、ビームライン部門、分析・計測部門で構成されており、産・学・行政の連携施設としての「中部シンクロトロン光利用施設（仮称）」の設計・建設及び運営において、学術と技術面を中心に、指導的な役割を担う。また、名古屋大学をはじめ東海地区の厚いユーザー層が自らの研究を加速度的に展開するとともに新規ユーザーや産業界への学術的・技術的支援を行う予定である。

## 2. 光源加速器

### 2.1 概要

現在ほとんどのシンクロトロン光源用電子蓄積リングでは常伝導の電磁石が使用され、その典型的な磁場強度はおよそ1 T（テスラ）である。このため10 keVを超えるような硬 X 線領域で十分な強度のシンクロトロン光を生成するには、2.5 GeV 程度以上の電子エネルギーが必要となる。このような高エネルギーの加速器は必然的に周長が長くなり、建設コストも高額になる。実際、日本国内において多数のシンクロトロン光源が稼動している現在でも10 keV 超の X 線を十分な強度で多数のビームラインに供給できる施設は、SPring-8 と Photon Factory の2つの施設に過ぎない。シンクロトロン光利用者の大半は X 線を利用するといわれており、中部シンクロトロン光利用施設に関するアンケート調査の結果でも X 線領域での利用者が65%以上ある。このため、電子エネルギーを比較的強く抑えながら10 keV 超の X 線の利用を可能にするため、以下に述べるように蓄積リングの偏向電磁石の一部を超伝導電磁石とする。この方法は、ローレンスパークレー研究所の Advanced Light Source に導入されているが<sup>2)</sup>、中部シンクロトロン光利用施設のように周長の短い小型リングにおいて、多数の X 線ビームラインを引き出す方法として有効であるため採用した。

中部シンクロトロン光利用施設は、大学や研究所での研究・教育だけでなく産業界との連携を目指した施設である。その中核の光源加速器の設計にあたっては以下の点を考慮している。

- (1) 地域の中核施設として適正規模であること
- (2) コストパフォーマンスに優れていること
- (3) 10 keV 以上の X 線を10本以上のビームラインに供給できること
- (4) 挿入光源を設置可能であること
- (5) トップアップ入射による一定電流運転が可能であること
- (6) 既存の技術で無理なく実現可能であること
- (7) 運転維持管理が容易であること

(1)については、具体的にどの程度を適正規模というのか、判断は分かれるところであるが、全国共同利用施設である高エネルギー加速器研究機構の Photon Factory（周長187 m）と比べて十分に小さいことをひとつの目安とした。すなわち周長50 mを大幅に上回らないことを目標とした。(3)については、中部地区のシンクロトロン光の需要が X 線領域に多いことを考慮した。(4)は、極紫外・軟 X 線領域での高輝度光の需要、あるいは、より短波長の X 線の要求に応えるためにアンジュレータや超伝導ウィグラの導入の余地を残しておく、というものである。(5)は、既に一部の先進的なシンクロトロン光施設で導入されているトップアップ運転を比較的早い段階から導入し、常に一定

の質の光を供給するためである。(6)については、既存施設の加速器研究者の協力を得ながら最新の加速器技術を導入するものの、基本的には、実績のある技術を中心にして、開発的要素を極力抑え、建設及び立ち上げ調整を短期間で終了し、可能な限り早く定常運転を開始するためである。また、(7)については、建設期、初期運転期にはできるだけ多数の加速器研究者・技術者の参加を求めるが、その後の定常運転期は、比較的小さな組織で運転維持管理できるよう、設計段階から配慮するべきであると考えた。このため、加速器制御システムは汎用的なものを導入するとともに、運転の自動化を建設後の早い段階で進めていく。また、(1)および(2)とも関係することであるが、定常の運転状態でのランニングコストを抑えるため電子エネルギーは比較的低い値とし、蓄積リングとブースターシンクロトロン電磁石数、電磁石形状の最適化を行って電磁石で消費する電力を抑える。

上記のような考え方をもとに設計した加速器の主要パラメータを Table 1 に、また、加速器及び実験ホールの配置案を Fig. 1 に示す。最大の特徴は蓄積リングの全12台の偏向電磁石中4台を超伝導としている点にある。これにより、小型・低エネルギーでありながら10 keV 超の X 線を10本以上のビームラインに供給できるようになっており、大型施設並みの X 線発生能力を備えている。蓄積リングは、ビームエネルギー1.2 GeV、周長62.4 m、エミッタンス53 nm-rad であり、計4本の直線部を有する。直線部長さは約2.8 mであり、1箇所はビーム入射、1箇所は高周波加速、残り2箇所は挿入光源に利用する。ビーム計

Table 1 Main parameters of accelerators

• 電子蓄積リング		
蓄積電子エネルギー		1.2 GeV
蓄積電流		300 mA 以上
周長		62.4 m
偏向電磁石		
常伝導偏向電磁石 (1.4 T)	偏向角39°×8台	
超伝導偏向電磁石 (5 T)	偏向角12°×4台	
加速周波数		500 MHz
自然エミッタンス		53 nm-rad
ラティス構成		Triple Bend セル4回対称
直線部		2.8 m×4
• 入射器		
1.2 GeV ブースターシンクロトロン		
電子エネルギー		1.2 GeV
偏向電磁石磁場		1.1 T
周長		38.4 m
加速周波数		500 MHz
加速繰り返し		1 Hz
ライナック		
電子エネルギー		50 MeV
パルス幅		1 μsec
加速繰り返し		1 Hz

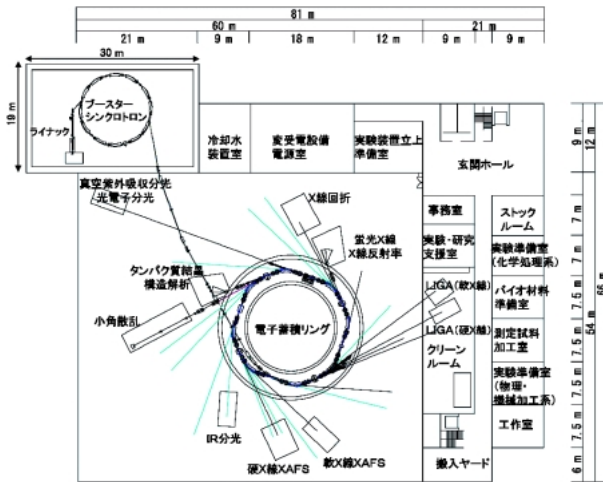


Fig. 1 Layout of accelerators and beamlines.

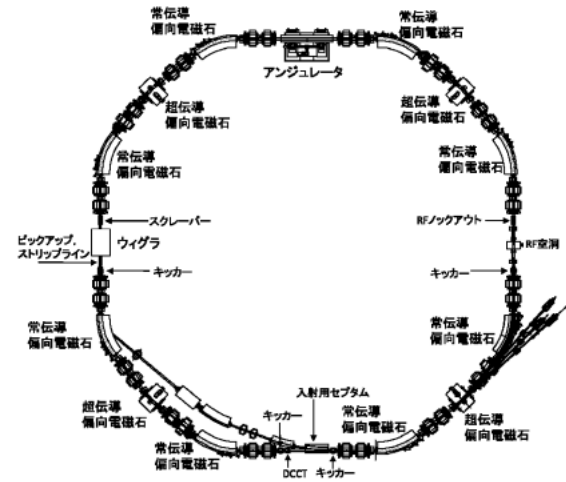


Fig. 2(a) Layout of storage ring.

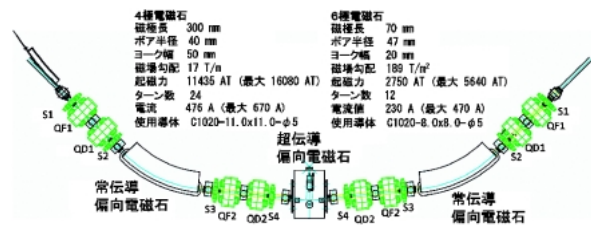


Fig. 2(b) Layout of a cell of storage ring.

測用の機器もこれらの直線部に分散して配置する。実験ホールに隣接する建物内にフルエネルギーの入射器を設置する。運転の容易さを考慮し入射器はブースターシンクロトロンとする。トップアップ運転の導入に備え、ブースターシンクロトロンのエネルギーは1.2 GeVのフルエネルギーとする。蓄積リングへの入射をフルエネルギーで行うことは、蓄積リングでの加速を避けることにより、初期の立ち上げ調整が容易になるという利点もある。前段入射器はエネルギー50 MeVのライナックとする。ブースターシンクロトロンとライナックを納める入射器室の床面は、蓄積リングを設置する実験ホールの床面よりも3mほど低い半地下とし、入射路がビームライン設置の妨げにならないように計画している。これは放射線防護の面からも有用である。

Fig. 1に示すように蓄積リング及び実験ホールはおよそ81m×66mの建物内に配置している。実験エリアの外側に加速器コントロール室や試料準備室、クリーンルームなどを配置し、一部クリーンルームにはシンクロトン光を直接導くこととしている。電磁石電源類など加速器運転用機器は蓄積リング内側の空間に設置する。受電設備、冷却水設備、空調設備なども同じ建物内に設置する。

## 2.2 電子蓄積リング

電子蓄積リングの機器配置を Fig. 2(a) (b)に、主要パラメータを Table 2に示す。この蓄積リングでは超伝導電磁石、常伝導電磁石、さらに2台の挿入光源が実装される。Fig. 2(b)において、QFおよびQDはそれぞれ電子ビームを収束させるための4極電磁石（Focusing Quadrupole magnet）と発散させるための4極電磁石（Defocusing Quadrupole magnet）を示している。またSは6極電磁石（Sextupole magnet）である。数字を付けているのは磁場の強さの違う電磁石を区別するためである。

加速器の電磁石配列（ラティス）の設計は、電子ビーム

の品質や、挿入光源やビームラインなどの配置を決定づけるものであり、加速器を検討する上で最も基本的な部分である。電子蓄積リングのラティスは、通常、ある基本構造を繰り返すことで構成され、この基本構造はセルと呼ばれる。シンクロトン光源で広く用いられているセルにはDouble Bend Achromat (DBA) セルあるいはTriple Bend Achromat (TBA) セルなどがある。一般にセルの数を増やすとエミッタンスを小さくすることができるため、いわゆる第3世代シンクロトン光源の多くでは比較的電子ビームのエネルギーが低いものでもセル数は10以上となっている。一方で、セル数が多くなると蓄積リングの周長が長くなり建設コストが上がる。

本施設では、Triple Bend すなわち偏向電磁石3台を含むセルを4回繰り返すことで蓄積リングを構成することとした。通常は各偏向電磁石の偏向角は同じにするが、本計画では3つの偏向電磁石の中央のものを超伝導電磁石とし、それ以外を常伝導電磁石とする。

電磁石1台あたりの偏向角は常伝導電磁石で39°、超伝導電磁石で12°と異なる値にしてある。これは超伝導電磁石について実績重視で設計した結果得られた偏向角を採用したためである。このラティス案では合計4台の超伝導偏向電磁石が設置される。後述するように1つの超伝導偏向電磁石からは3本のビームラインに光を取り出すことが可能であるため、合計では最大12本のX線ビームラ

Table 2 Parameters of storage ring

	低エミッタンスモード	中エミッタンスモード
ビームエネルギー	1.2 GeV	
周長	62.4 m	
蓄積電流	> 300 mA	
エミッタンス	53 nm-rad	97 nm-rad
エネルギー広がり	$8.41 \times 10^{-4}$	
ラティス構造	Triple bend セル 4 回対称	
挿入光源用直線部	2.8 m × 1 本, 2.48 m × 1 本	
ベータトロン振動数	(4.72, 3.23)	(4.72, 3.23)
モーメントムコンパクションファクター	0.022	0.023
放射損失	86.2 keV/turn	
周回周波数	4.804 MHz	
RF 周波数	500 MHz	
ハーモニック数	104	
RF 電圧	500 kV	
RF バケットハイト	0.926%	
ダンピングタイム	(5.80, 5.79, 2.90) msec	
$(\beta_x, \beta_y, \eta_x)$ @直線部	(29.9, 3.20, 1.2) m	(26.6, 3.49, 0.7) m
$(\beta_x, \beta_y, \eta_x)$ 最大値	(29.9, 10.5, 1.2) m	(26.7, 11.0, 0.7) m

インが建設可能となる。

さらに数多くの偏向電磁石を超伝導とすることも可能であり、その場合にはさらに数多くの X 線ビームラインが建設できることになる。しかし、この場合、放射損失による電子ビームのエネルギー低下が非常に大きくなり、それを補償するための高周波加速系の能力を高める必要があるが、これは建設コストの増大をもたらす。また、超伝導電磁石の増加そのものも建設コストを押し上げる。あるいは、セル数を増やすことでエミッタンスはさらに小さくできるが、周長が大きくなるため建設コストは増大する。今回採用した 4 セル案は、最小限の建設コストで必要十分な X 線ビームライン数を確保するように最適化されたと考えている。

蓄積リングの光学関数を Fig. 3 に示す。Fig. 3(a) は水平および垂直方向のベータ関数の平方根であり、Fig. 3(b) はエネルギー分散関数である。それぞれ蓄積リングの 4 分の 1 周における値を示している。ベータ関数の平方根は蓄積リング内を周回している電子の広がり に比例する量であり、超伝導偏向電磁石 (Superbend) の位置で水平方向のベータ関数の平方根が他の部分に比べ小さくなるように調整している。これは、電子の水平方向の広がりを抑えることで超伝導偏向電磁石の電子ビームへの悪影響を抑えるためである。Fig. 3(b) のエネルギー分散関数は、蓄積リング内を周回している電子のエネルギーの相対的なずれに対する水平方向の位置のずれを表す量である。1980 年代に建設された第 2 世代光源、90 年代の第 3 世代光源では直線部のエネルギー分散を消去した、いわゆるアクロマートラティスが広く採用されているが、2000 年代に入り建設が進められている、いわゆる新第 3 世代光源では、アク

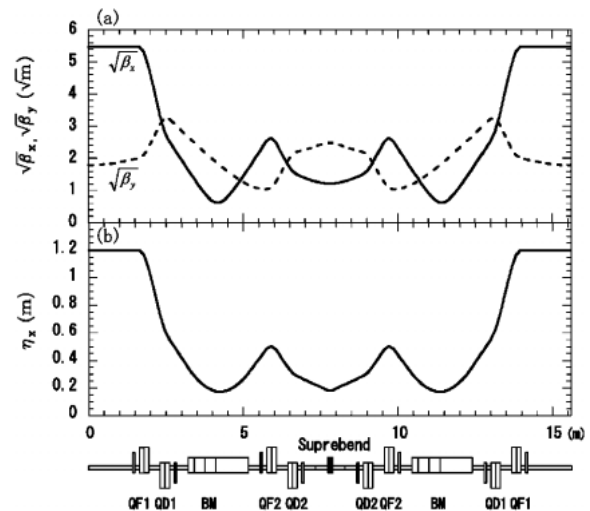


Fig. 3 Optical functions of 1/4 of storage ring. Panel (a) shows the square root of the horizontal (solid line) and the vertical (dashed line) beta functions. Panel (b) shows the horizontal dispersion function.

ロマートな条件を破ることで低エミッタンス化を図る場合が増えている。中部シンクロtron光利用施設における蓄積リングのラティス設計でも、限られた周長・セル数の制約のもとで可能な限りエミッタンスを小さくするために直線部のエネルギー分散を消去しないラティスを採用している。直線部のエネルギー分散を1.2 m と大きく取り、エミッタンスを最小にした低エミッタンスラティスと、直線部の分散を0.7 m と比較的小さくした中エミッタンスラティスを用意している。後者は直線部のエネルギー分散が大きいことが何らかの形で光源性能に影響を与える場合のため

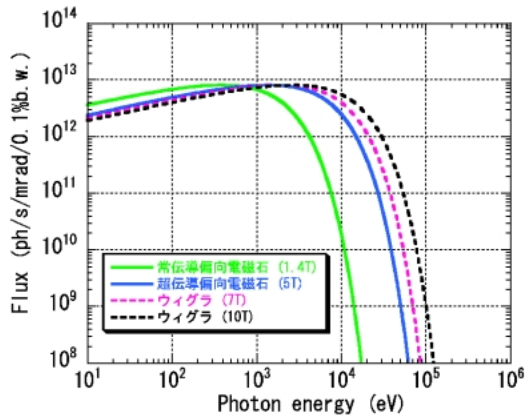


Fig. 4 Flux of synchrotron radiation from bending magnets and wigglers. ( $I_b = 300$  mA)

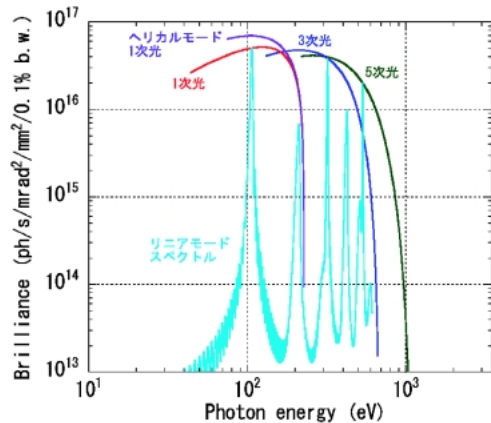


Fig. 5 Brilliance of synchrotron radiation from an undulator. ( $I_b = 300$  mA)

Table 3 Parameter of variably-polarizing undulator

磁石列方式	APPLE-II 型
周期長	60 mm
周期数	33
残留磁束密度	1.36 T
磁石ブロック	x: 40 mm, y: 60 mm
最小磁極間隙	28 mm
Max. K Parameter	2.90 (Hor.) 1.65 (Ver.) 1.43 (Hel.)

に用意した。Table 2 には中エミッタンスモードでの蓄積リングのパラメータも示している。

超伝導および常伝導偏向電磁石からのシンクロトロン光のスペクトルを Fig. 4 に示す。超伝導電磁石からのシンクロトロン光は臨界エネルギー4.8 keV であり10 keV 以上のX線も十分な強度で利用できる。一方、常伝導偏向電磁石からのシンクロトロン光はミリ波・テラヘルツ波から5 keV 程度の軟X線にいたる領域で十分な強度を持つ。挿入光源として7 T あるいは10 T 程度の超伝導ウィグラを導入することで30 keV 以上のより高エネルギー・短波長のX線を生成することもできる。また、適切な周期長のアンジュレータを設置することで、真空紫外から軟X線の領域で高輝度シンクロトロン光を発生することができる。アンジュレータのパラメータ案およびスペクトルをそれぞれ Table 3 および Fig. 5 に示す。

### 2.3 超伝導偏向電磁石

小型でありながらX線領域のシンクロトロン光を発生させるため5 T 超伝導偏向電磁石を蓄積リングの偏向電磁石の一部に使用する。3本のビームラインを設置する場合、超伝導偏向電磁石内での電子の偏向角 $12^\circ$ のうち、電子の偏向角が $3^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $9^\circ$ の位置からのシンクロトロン光を取り出す。超伝導偏向電磁石の詳細は検討中であるが、現

Table 4 Main parameters of a superbend

鉄心形式	C 型
ギャップピーク磁場	5 T 以上
偏向角	$12^\circ$ (1.2 GeV)
コイル電流密度 (オーバーオール)	127 A/mm <sup>2</sup>
電流	150 A
超伝導線	NbTi/Cu
鉄心材料	SUY (電磁軟鉄)
ウォームボアギャップ	50 mm
鉄心ポールギャップ	80 mm
ポール形状 (ビーム方向, 水平方向)	(70 mm, 180 mm)
外形寸法 (軸方向, 高さ, 幅)	(840 mm, 2000 mm, 1136 mm)
全体重量	3500 kg
GM 方式小型冷凍機	45 W (50 K), 1.5 W (4.2 K)

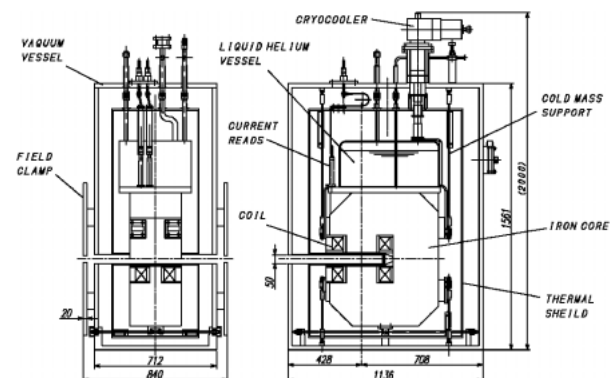


Fig. 6 Layout of superconducting bending magnet.

在の案を Table 4 及び Fig. 6 に示す。

加速器用電磁石では7 T 程度のものが超伝導ウィグラとして稼働実績があるようであり、10 T のものも蓄積リングに組み込んでテストが行われている<sup>3)</sup>。しかし、超伝導偏向電磁石は蓄積リングの運転に必須の偏向電磁石の一

部であり、これが正常に機能しないと加速器の運転自体が停止してしまうことを考慮し、安定に稼動している実績のある5 Tを磁場強度として選択した。

超伝導偏向電磁石のサイズは、磁場の染みだしを防ぐためのフィールドクランプを含めたビーム進行方向の長さが840 mm、幅1136 mm、高さ2000 mmである。鉄心形状は、真空ダクトのペーキング、真空ダクトもしくは電磁石の交換の可能性を考慮してC型とする。冷却には、コストとメンテナンス性を考えて小型冷凍機を使用し、それぞれの超伝導電磁石に1台ずつ配置する。冷凍機は2ステージタイプとし、第1ステージで熱シールドの冷却、第2ステージで液体ヘリウムの蒸発ガスを冷却する。液体ヘリウムタンクをクライオスタット内に配置し、伝熱板を介してコイルを冷却する。冷凍機の故障や停電時でも、液体ヘリウムを定期的に補充することによって運転が可能な構成とする。数%程度予想される磁場強度の個体差は個別電源励磁とすることで対処する予定であり、磁場測定の精度で補正が可能である。

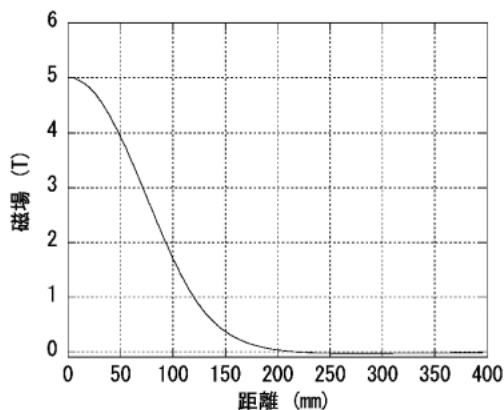


Fig. 7 Magnetic field of superbend along beam axis.

超伝導偏向電磁石の磁場強度を電子ビームの進行方向に対してプロットしたものが Fig. 7 である。磁場強度はピーク部分で5 Tである。シンクロtron光の取り出し角度 $3^\circ$ および $9^\circ$ の位置はピーク部分より約45 mm 離れているが、磁場強度は4.3 T 以上である。

Fig. 8 に超伝導偏向電磁石からの放射光取り出しポート案を示す。超伝導偏向電磁石の偏向角は $12^\circ$ と通常の偏向電磁石よりも小さく、ここから3本のビームラインを取り出すためには、下流にある電磁石との干渉を避けて放射光取り出しの基幹部を作製する必要がある。

超伝導偏向電磁石による6極磁場成分の大きさは、3次元磁場計算によるシミュレーションの結果より、 $B''L=29.8 \text{ T/m}$ である。これは蓄積リングに配置予定の6極電磁石により十分に補正可能な値である。また、6極成分補正後のダイナミックアパーチャーは Fig. 9 に示すとおり、入射蓄積に十分な大きさが得られている。

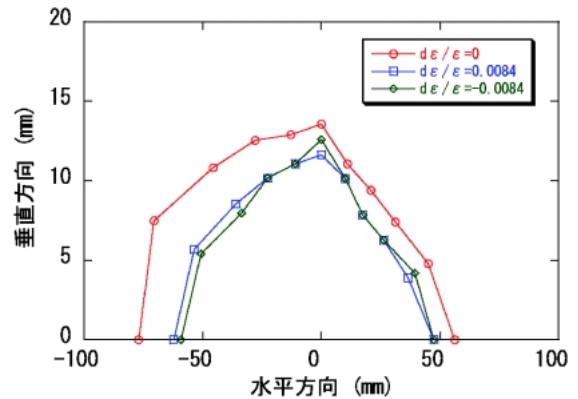


Fig. 9 Dynamic aperture after chromaticity correction. Red line shows the aperture for electrons with designed energy. Blue and green lines show the apertures for the electrons with the energy spread of  $\pm 10\sigma_E$ .

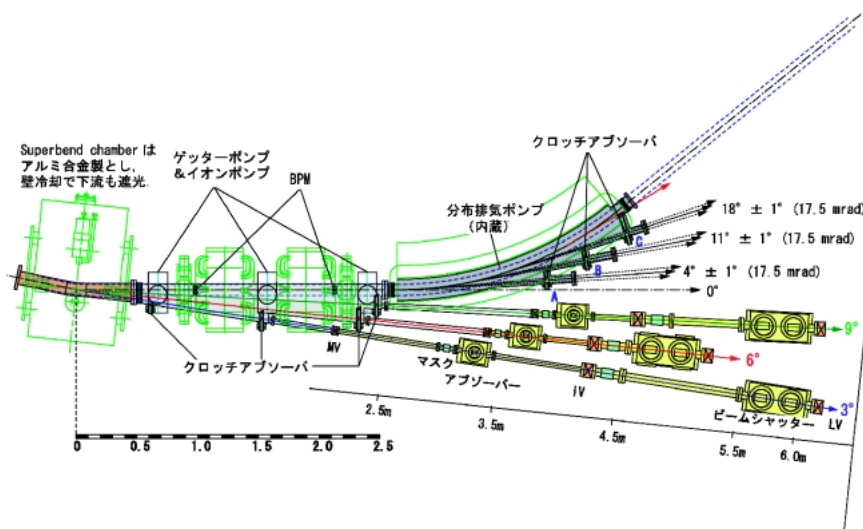


Fig. 8 Channel from superbend.



Fig. 10 Layout of booster synchrotron and linac.

## 2.4 入射器

入射はフルエネルギー、すなわち蓄積リングの運転エネルギーにまで加速された電子ビームを直接入射するものとする。蓄積リングでのビーム加速が不要となることから、立上調整の時間の短縮が期待できる。また、いわゆるトップアップ入射が可能となる。トップアップ運転は、入射を頻繁に繰り返すことで蓄積ビーム電流値を概ね一定に保つ技術であり、既にいくつかのシンクロトロン光源で導入されている加速器技術である。従来は数時間ないし数10時間ごとに数10分程度かけてビームを入射していたが、トップアップ運転では、数分毎にごく短い時間入射を行うことで、入射による利用実験の中断を最小限にし、また、蓄積ビーム電流を概ね一定に保つことでビームライン光学系の安定性を高め、常に同じ質で安定な光を供給できるため実験結果の解析精度も飛躍的に高めることができる。

入射器には運転の容易さを考慮し、1.2 GeVのシンクロトロンを採用する。シンクロトロンのRF周波数は蓄積リングと同じ500 MHzとする。前段入射器は50 MeVのライナックとする。ライナックはシンクロトロンへのシングルバンチ入射が可能なものとする。50 MeVの電子エネルギーを1.2 GeVまで加速するためブースターシンクロトロンを用いる。ブースターシンクロトロン及びライナックの機器配置をFig. 10に、主要パラメータをTable 5に示す。

ブースターシンクロトロンは可能な限りコンパクトにすることを目標に設計した。ラティスは、収束4極電磁石と発散4極電磁石を、偏向電磁石を挟んで交互に配置した、いわゆるFODOセルである。なお、高周波加速空洞、入射用のパルス電磁石群を設置するためのスペースとして、収束4極電磁石(QF)のセクションに1m程度のフリースペースを計6箇所設けてある。高周波加速空洞1台、入射用セプタム電磁石、出射用セプタム電磁石、入射用キッカー電磁石3台、出射用高速キッカー電磁石1台、さらにスクリーンモニター3台、ビーム電流モニター1台、チューンモニター用RFKO装置及びストリップライン型ビーム信号検出器を1台ずつ設置する。

ライナックは電子ビームを生成しブースターシンクロト

Table 5 Parameters of booster synchrotron and linac

ブースターシンクロトロン	
ビームエネルギー	1.2 GeV
偏向電磁石磁場強度 (1.2 GeV)	1.1 T
周長	38.4 m
RF周波数	500 MHz
繰り返し	1 Hz
入射エネルギー	50 MeV
最大エネルギー	1.2 GeV
ベータatron振動数 (H, V)	(2.25, 1.25)
モーメントコンパクションファクター	0.2265
エミッタンス (1.2 GeV)	688 nm-rad
エネルギー広がり (1.2 GeV)	$5.01 \times 10^{-4}$
RF周波数	500 MHz
ハーモニック数	64
RF電圧	500 kV
放射損失 (1.2 GeV)	51.9 keV/turn
RFバケットハイト (1.2 GeV)	0.39%
電流	20 mA
ライナック	
ビームエネルギー	50 MeV
電流	100 mA
繰り返し	1 Hz
RF周波数	2856 MHz
エネルギー広がり	~1%
規格化エミッタンス	$25 \times 10^{-6}$ m-rad
パルス長	~1 $\mu$ sec

ロンへの前段加速を行う。加速エネルギーはブースターシンクロトロンが十分に安定に動作できる50 MeVを選んだ。加速の主周波数は、多くのライナックに用いられ要素技術が確立されているSバンドと呼ばれる2856 MHzを用いる。また、グリッドパルサーを用いることでブースターシンクロトロンへの電子ビームのシングルバンチ入射が可能である。

## 3. ビームライン

中部シンクロトロン光利用施設は、工業材料評価や試験研究といった産業界の利用を重視しており、その実現のため、当初から建設・整備されるビームラインとしてTable 6に示す6本が検討されている。これらのうち硬X線を利用するビームラインは超伝導偏向電磁石ビームラインに設置される。

表中1, 2, 3のビームラインは20 keV (ウイグラによりさらに高エネルギーをカバーすることも計画されている) から低エネルギーのすべての元素をカバーできるXAFS測定ラインを揃えるものである。これにより、工業材料で軽元素材料が重要性を増してきている現状に対応することができる。また、光電子分光も様々な材料開発において重要性が増しており、アンジュレータ・ラインとして設置す

Table 6 Beamlines for an early phase

	ビームライン名	測定手法	エネルギー範囲	光源	予定される光学系
1.	材料化学状態・構造分析Ⅰ	硬 X 線 XAFS	5-20 keV	Superbend	CM, DXM, RFM
2.	材料化学状態・構造分析Ⅱ	軟 X 線 XAFS	1-6 keV	Bending Magnet	CM, DXM, RFM
3.	材料化学状態・構造分析Ⅲ	真空紫外分光 光電子分光	0.03-1.5 keV	Undulator	VIAM
4.	有機・高分子材料分析	小角散乱	5-20 keV	Superbend	TM, DXM
5.	総合材料評価Ⅰ	X 線回折	5-20 keV	Superbend	VCM, SDXM, VRFM
6.	総合材料評価Ⅱ	蛍光 X 線分析 反射率測定	5-20 keV	Superbend	VFM, ASXM

§ CM: collimation mirror, DXM: plane 2 crystal monochromator, RFM: refocusing mirror, TM: toroidal mirror, VIAM: variable-included-angle Monk-Gillieson mounting monochromator, VCM: vertical collimating mirror, SDXM: sagittal focusing 2 crystal monochromator, VRFM: vertical refocusing mirror, VFM: vertical focusing mirror, ASXM: asymmetric 1 crystal monochromator.

る計画である。有機・高分子材料では小角散乱の有用性が急速に認識され他施設でも設置されてきているが、独自のカメラ長と小角/超小角/広角をカバーできる柔軟性の高い装置と広い実験スペースを用意する予定である。総合材料評価ビームラインでは、平行性が高く波長可変の容易なビームラインと、非対称ヨハン型分光結晶を用いた微小集光で光束密度の高いビームラインを並列して設置し、かつ、使いやすいハード設計とソフトを用意する予定である。

さらに、これらのビームラインでは測定環境を企業等での実際の開発環境に合わせることを可能とすることが望まれており、様々なガス雰囲気中や温度・圧力にも柔軟に対応することが検討されている。

また、当初計画の6本その他、タンパク質結晶構造解析用ビームラインやナノ加工（LIGA）用ビームライン、赤外分析用ビームラインも段階的に整備される予定である。さらに、特定の企業が自社専用のビームラインを建設して使用することも可能であり、そのための運用の枠組みも検討中である。

なお、シンクロtron光施設は、愛知県が「知の拠点」計画において建設・整備を予定している「科学技術交流センター（先導的中核施設）」に隣接する形で計画が検討されており、先導的中核施設に整備される研究開発機器や研究者との有機的な連携によって、大企業のみならず中堅・中小企業の研究開発にも資することが期待されている。利用時間の配分についても、学術的価値の評価のみにかたよらず、企業の測定ニーズに柔軟に応じる高性能な汎用機器としての位置付けで対応される予定である。建設予定のビームラインについて、中部地区の産業界（愛知県が実施）と大学（名古屋大学小型シンクロtron光研究センターが実施）にアンケート調査を行い、ユーザーのニーズの把握を行っている。産業界、大学ともに十分な利用ニーズが見込まれており、地域の中核的研究拠点として機能することが期待される。

#### 4. まとめ

名古屋大学が提唱してきた、小型シンクロtron光施設を中心とした「光科学ナノファクトリー」構想は、愛知県の「知の拠点」計画と一体となり、中部シンクロtron光利用施設として実現されようとしている。「知の拠点」計画予定地は、名古屋市の都心部から東へ約20 kmに位置する愛・地球博の長久手会場に隣接しており、東部丘陵線（リニモ）や東海環状自動車道により交通の便がよい場所である。中部シンクロtron光利用施設は、愛知県の予定している先導的中核施設とともに中部地区における計測・分析拠点として、大学や研究所における基礎的研究、教育はもとより、産業界における実用を目指した研究に対応できる施設として、早期に実現するための検討が進められている。建設が決定した場合、その4年後には供用が始まっているように整備を進めていく予定である。

#### 謝辞

高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所の谷本育律氏、宮内洋司氏、浅岡聖二氏には本計画の真空系、ビームライン基幹部等の検討に際して非常に多くのご協力を頂いており、この場をお借りしてお礼申し上げます。愛知県、産業界、科学技術交流財団、県内の大学等研究機関の方々から構成される「小型シンクロtron光利用施設」具体化ワーキンググループのメンバーの方々には、計画の実現に向けて多くの困難な問題の解決に当たって頂くとともに有益なご助言を賜りここに深謝致します。また、高エネルギー加速器研究機構加速器研究施設の堀洋一郎氏、高輝度光科学研究センターの佐々木茂樹氏、九州シンクロtron光研究センターの江田茂氏、兵庫県立大学の内海裕一氏、分子科学研究所の繁政英治氏には名古屋大学小型シンクロtron光研究センターの特任あるいは客員教員として多くのご助言を頂きありがとうございます。最後に、これまで名古屋大学においてシンクロtron光施設建設計画に携わって頂いた方々、現在も関わって頂いている多くの方



々に感謝致します。特に小型シンクロトロン光研究センター協力教員の方々には多大なご協力頂いており、心より感謝致します。

## 参考文献

- 1) 高嶋圭史：放射光，Vol. 20, No. 3, 197 (2007).
- 2) D. Robin et al.: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 538, 65-92 (2005).
- 3) K. Soutome et al.: Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, 250-252 (2003).

## ● 著者紹介 ●

### 高嶋圭史

名古屋大学小型シンクロトロン光研究センター・准教授

E-mail: takasima@numse.nagoya-u.ac.jp

専門：加速器

#### 【略歴】

1998年3月広島大学大学院理学研究科博士課程修了，博士（理学）。1998年名古屋大学工学研究科助手，1999年分子科学研究所助手，2003年名古屋大学工学研究科助手を経て，2006年6月より現職。

### 加藤政博

自然科学研究機構分子科学研究所極端紫外光研究施設・教授

E-mail: mkatoh@ims.ac.jp

専門：加速器，ビーム物理学

#### 【略歴】

1986年東京大学大学院理学系研究科物理学専門課程中退，理学博士。高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所助手，分子科学研究所助教授を経て，2004年より現職。2007年6月現在，分子科学研究所分子制御レーザー開発研究センター教授（併任），総合研究大学院大学物理科学研究科教授（併任），名古屋大学大学院工学研究科客員教授，高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所客員教授。

### 渡邊信久

名古屋大学小型シンクロトロン光研究センター・教授

E-mail: nobuhisa@nagoya-u.jp

専門：蛋白質結晶学

#### 【略歴】

1989年3月筑波大学大学院博士課程物理学研究科修了。1989年4月日本学術振興会特別研究員，1990年1月高エネルギー物理学研究所放射光実験施設助手，1999年10月北海道大学大学院理学研究科助教授。2007年6月より現職。

### 保坂将人

名古屋大学小型シンクロトロン光研究センター・准教授

E-mail: m-hosaka@nucl.nagoya-u.ac.jp

専門：加速器

#### 【略歴】

1994年東北大学理学研究科博士課程修了，博士（理学），分子科学研究所極端紫外光研究施設を経て2006年11月より現職。

### 竹田美和

名古屋大学小型シンクロトロン光研究センター・教授，センター長

E-mail: takeda@numse.nagoya-u.ac.jp

専門：半導体材料学

#### 【略歴】

1977年3月京都大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学，工学博士。1977年4月京都大学助手，1986年11月京都大学講師，助教授，1991年4月名古屋大学教授，2007年4月名古屋大学小型シンクロトロン光研究センター長。

### 山根 隆

名古屋大学大学院工学研究科・教授

E-mail: yamane@nubio.nagoya-u.ac.jp

専門：構造生物学，タンパク質構造科学

#### 【略歴】

1972年8月大阪大学大学院理学研究科博士課程中退，理学博士。1972年9月大阪大学助手，1974年8月名古屋大学助手，1986年7月名古屋大学助教授，1996年4月より現職。

### 曾田一雄

名古屋大学大学院工学研究科・教授

E-mail: j45880a@nucc.cc.nagoya-u.ac.jp

専門：光物性

#### 【略歴】

1982年名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了，工学博士。1982年東京大学物性研究所軌道放射物性部門助手。1991年大阪府立大学工学部講師，1994年名古屋大学大学院工学研究科助教授を経て現在，同教授。

# Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility Project

Yoshifumi TAKASHIMA<sup>1,2</sup>, Masahiro KATOH<sup>3,1</sup>, Nobuhisa WATANABE<sup>1,2</sup>,  
Masahito HOSAKA<sup>1,2</sup>, Yoshikazu TAKEDA<sup>1,2</sup>, Takashi YAMANE<sup>2</sup>,  
Kazuo SODA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusaku, Nagoya 464-8603, Japan

<sup>2</sup>Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusaku, Nagoya 464-8603, Japan

<sup>3</sup>UVSOR, Institute for Molecular Science, 38 Nishigo-naka, Myodaiji, Okazaki 444-8585, Japan

**Abstract** Nagoya University has proposed a project of a new small synchrotron radiation facility for hard X-rays since 1991. The key equipment of the facility is a compact electron storage ring which can supply hard X-rays. The specifications of the project are as follows: the energy of the stored electron beam is 1.2 GeV, the circumference 62.4 m, and natural emittance 53 nm-rad. The configuration of the storage ring is based on the triple bend cell with twelve bending magnets. Eight of them are normal conducting magnets of 1.4 T, while four of them are superconducting ones (superbends) of 5 T. The bending angle of the superbend is 12 degrees and two or three hard X-ray beamlines can be constructed for each superbend. The electron beam is injected from a booster synchrotron with the energy of 1.2 GeV as full energy injection for the top-up operation. A 50 MeV linac is used as an injector to the booster synchrotron. The project has now developed to "Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility" as the principal facility of the project of Aichi prefecture "Knowledge Hub" to establish a new research center for technological innovation.

---