

中部シンクロtron光利用施設(仮称)計画のための 光源加速器の検討

高嶋圭史¹, 保坂将人¹, 山本尚人¹, 森本浩行¹, 加藤政博^{2,1}
¹名大SRセンター, ²UVSOR

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(仮称)として実現されようとしている。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tron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す計画である。

一方、愛知県では、地域の科学技術振興策である「科学技術交流センター」構想の強化のためシンクロtron光施設を導入することを検討しており、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「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tron光施設計画実現のための活動を行っている。

中部シンクロtron光利用施設の加速器の施設の特徴は、電子蓄積リングを周回する電子のエネルギーを1.2 GeVという比較的低値に抑え、12台の偏向電磁石のうち、4台を超伝導とすることで硬X線を発生することである。超伝導電磁石の導入方法としては、挿入光源としてのウィグラとする方法もあるが、ウィグラから取り出せるビームライン数は限られており、複数のビームラインを取り出そうとすると、下流側のダクトや電磁石設計が複雑になる。また、本計画のように周長の短い蓄積リングでは、挿入光源を設置できる直線部の数も限られる。偏向電磁石を超伝導とすることにより、コンパクトな蓄積リングでありながら多数の硬X線ビームラインの建設が可能となる。

シンクロtron光源における超伝導電磁石の利用は、非常に小型の光源リングにおいて実績があり、また、いわゆる挿入光源において利用されている例があるが、比較的規模の大きなリングの偏向電磁石の一部を超伝導とする手法は、米国の第3世代リングAdvanced Light Source(ALS)において採用されている。ただしALSでは、建設当初は全て常電導の偏向電磁石を用いていたが、後年、硬X線の需要に対応するために一部を超伝導のものに置換した。本施設のように中型リングで建設当初から積極的に超伝導偏向電磁石を採用するのは世界的にも初めてである。これにより多数の硬X線ビームラインの建設が可能となった。

蓄積リング及び実験ホールはおよそ81 m × 66 mの建物内に設置する。実験ホールは吹き抜けとし、実験ホール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tron光を直接導く予定である。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。

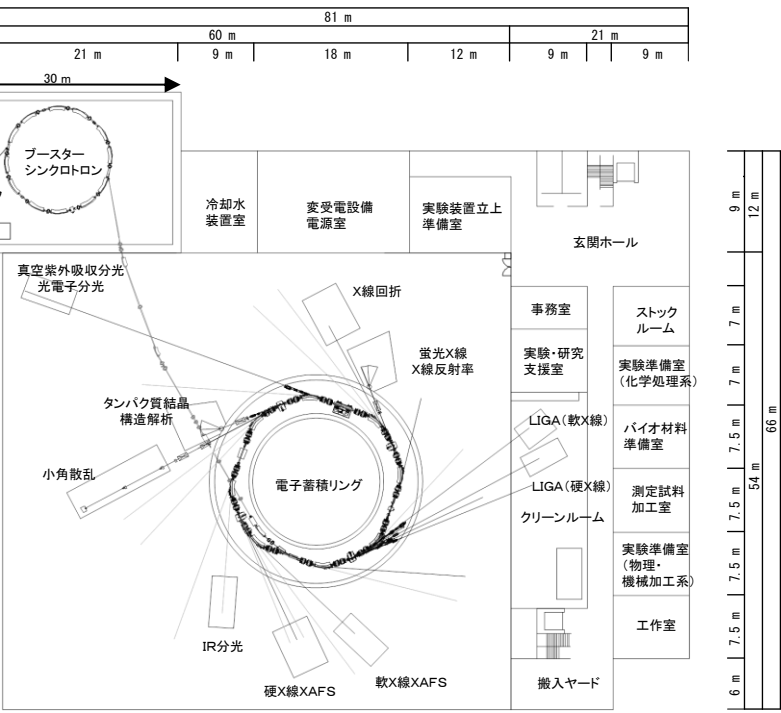
蓄積リングへの電子の注入は、シンクロtronを用いて1.2 GeVのフルエネルギーで行う予定である。これにより、トップアップ運転が可能となり、注入による実験の中断を最小限に抑え、電流値が一定であることでビームライン光学機器の安定性も高めることができる。また、超伝導偏向電磁石などの電流を常に一定に保つことが出来るため、早い段階から、蓄積リングの安定した運転が見込める。

蓄積リングを初めとする加速器は、基本的には実績のある技術を用いて設計を行い、開発的な要素は最小限にして、建設及び立ち上げ調整を短期間で修了できるようにする。

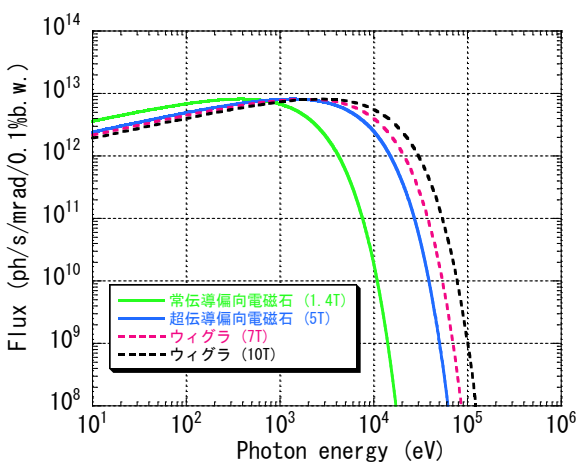
電子蓄積リング	低エミッタンスモード	中エミッタンスモード
ビームエネルギー	1.2 GeV	
周長	62.4 m	
蓄積電流	> 300 mA	
エミッタンス	53 nm-rad	97 nm-rad
エネルギー広がり	8.41×10^{-4}	
ラティス構造	Triple bendセル4回対称	
挿入光源用直線部	2.8 m × 1本, 2.48 m × 1本	(4.72, 3.23)
ベータトロン振動数	(4.72, 3.23)	(4.72, 3.23)
モーメントムコンパクションファクター	0.022	0.023
放射損失	86.2 keV/turn	
周回周波数	4.804 MHz	
RF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

ブースターシンクロtron	
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
ベータトロン振動数(H, V)	(2.25, 1.25)
モーメントム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)	5.01×10^{-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バケツハイ(1.2 GeV)	0.39 %
電流	20 mA

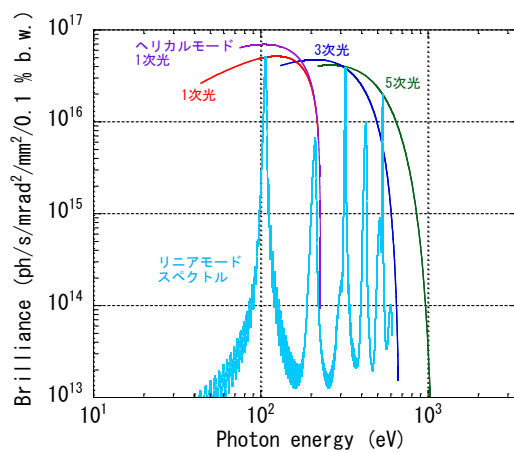
ライナック	
ビームエネルギー	50 MeV
電流	100 mA
繰り返し	1 Hz
RF周波数	2856 MHz
エネルギー広がり	~1 %
規格化エミッタンス	25×10^{-6} m-rad
パルス長	~1 μ sec



施設(1F)平面図(案)



偏向電磁石およびウィグラの放射光強度



アンジュレータの強度

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
最小磁極間隔	28 mm
Max. K Parameter	2.90 (Hor.), 1.65 (Ver.), 1.43 (Hel.)

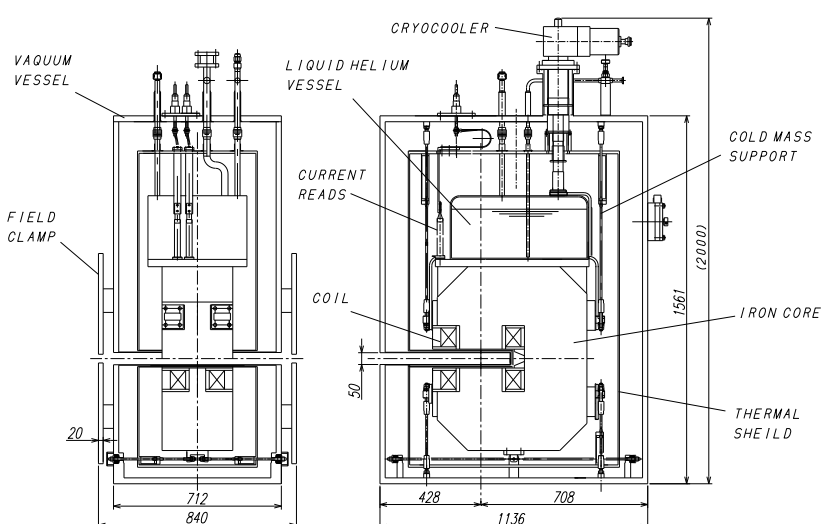
超伝導、常伝導偏向電磁石およびアンジュレータからのシンクロtron光のスペクトルを左図に示す。超伝導電磁石からのシンクロtron光は臨界エネルギー 4.8 keVであり10 keV以上のX線も十分な強度で利用できる。一方、常伝導偏向電磁石からのシンクロtron光はミリ波・テラヘルツ波から5 keV程度の軟X線にいたる領域で十分な強度を持つ。挿入光源として7 Tあるいは10 T程度の超伝導ウィグラを導入することで30 keV以上のより高エネルギー・短波長のX線を生成することもできる。また、適切な周期長のアンジュレータを設置することで、真空紫外から軟X線の領域で高輝度シンクロtron光を発生させる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

超伝導偏向電磁石の外形図およびパラメーター案を左図に示す。設置場所はTriple Bendセルの3つの偏向電磁石のうちの中央部であり、蓄積リング全体で4台導入する。超伝導偏向電磁石は蓄積リングの運転に欠かせない装置であり、これが正常に機能しないと蓄積リングの運転ができないということを考慮して、安定に移動している実績のある5 Tを磁場強度とする。これにより、比較的安全で成熟した加工技術のあるNbTiを超伝導線材に用いることができる。大きな、フィールドクランプを含めたビーム進行方向が840 mm、幅1136 mm、高さ2000 mmである。鉄心形状は、真空ダクトのベッキング、真空ダクトあるいは電磁石の交換の可能性を考慮してC型を予定している。

冷却方法は、小型冷凍機によりコイルを直接冷却する方式を採用する。コイルを液体ヘリウムに浸す方法では、大量の液体ヘリウムを使用するため、液体ヘリウムを供給するための大規模な装置や設備が必要である。大規模な加速器施設ではこのような選択肢もあろうが、本計画のような孤立した施設では現実的ではない。最近では冷凍機の信頼性も上がっており、直接冷却方式はコスト面でも、メンテナンスでも有利である。

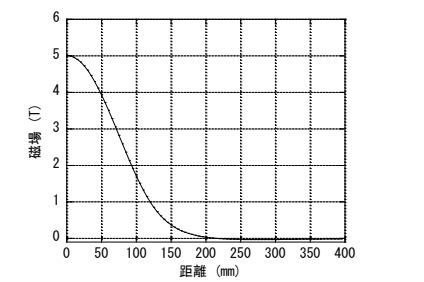
小型冷凍機は、それぞれの超伝導電磁石に1台ずつ配置する。液体ヘリウムは、室温から冷却する場合や、冷凍機の故障や停電のために、数十リットルのバッファタンクをクライオスタット内に設け、定期的に補充することによって超伝導状態が保てる構成とする。磁場強度の個体差が数%程度予想されるが、これは電磁石のおのおのを個別の電源で励磁することにより磁場測定の精度で補正が可能である。

本計画ではできるだけ実績のある技術を用いる方針であるが、その中でも超伝導偏向電磁石がほとんど唯一の例外である。このため名古屋大学小型シンクロtron光研究センターでは、放射線医学総合研究所との共同研究により、同研究所の所有する超伝導ウィグラ試験機を名古屋大学に移設して、磁場測定実験を始める。この超伝導ウィグラは、コイルの冷却に液体ヘリウムを利用する方式ではなく、冷凍機で直接コイルを冷却するタイプであり、これは本計画で導入予定の超伝導偏向電磁石と同じ方式である。この試験機の長期運転試験から得られる知見を本計画での実機設計・製作に取り入れることで、信頼性の高い超伝導偏向電磁石の実現を目指している。



超伝導偏向電磁石の概観図(案)

鉄心形式	C型
ギャップピーク磁場	5 T以上
偏向角	12° (1.2 GeV)
コイル電流密度 (オーバーオール)	127 A/mm ²
電流	150 A
超伝導線	NbTi/Cu
鉄心材料	SUY (電磁軟鉄)
ウォームポアギャップ	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)
全重量	3500 kg
GM方式小型冷凍機	45 W (50 K), 1.5 W (4.2 K)



ウィグラ磁場分布