

解説

# 民需対応シンクロトロン光共同利用施設 事業化計画—なのはな計画 施設計画の現状

石川 敏夫

日本 SOR 株式会社\*

## Facility Plan of the Nano-Hana Project Business Venture A Joint-Use Synchrotron Radiation Facility for Industry

Toshio ISHIKAWA

Japan SOR Inc.

The Nano-Hana Project is a business venture whose purpose is to construct and operate an industrial-user-oriented SR facility. The storage ring will be optimized to satisfy SR light source performance requirements of industrial users at reasonable cost. Main parameters of the storage ring are 2.0 GeV electron energy, 66.4 nm-rad natural emittance, 16 bending magnets (4 keV critical energy SR), 6 straight sections (4.5 m length) for insertion devices, and 107.5 m circumference.

Eight end stations will be installed at time of commencement of operation of the facility, of which 6 will be for analysis and 2 for lithography. The end stations will be rented to users with benefit through a short waiting time, preservation of user confidentiality, and technical support. The Nano-Hana SR facility will be located in Chiba Prefecture.

### 1. 事業化の目的と現状

なのはな計画は、企業等のユーザーの方々が利用し易い SR 共同利用施設の建設と運営を目的とした事業化計画です。昨年には70余のユーザー法人から利用意向書をご提出頂き、現在、各機関のご協力により今年半ばの建設着工を目指して、計画を進めております。

事業化の進展に合わせて施設計画も進めており、SR 発生装置は詳細設計を実施しています。実験ステーション (ES) とビームライン (BL) は、ユーザーの方々の意向を踏まえながら基本計画を進め、これら装置等からの要求を踏まえて建物の基本計画も進めております。

### 2. 施設整備・運営に関するニーズと基本方針

産業界の SR ユーザーと Labo-X 線ユーザーへの SR 利用に関するニーズ調査等に基づき、なのはな SR 施設の整備と運営の基本方針を定めました。

#### 2.1 施設整備に関するニーズと基本方針

##### (1) SR 発生装置

SR 光源のエネルギーと輝度へのユーザーニーズは **Fig. 1** の範囲 (上図の棒グラフと下図の塗りつぶした図形) にあります。すなわち、エネルギー 5~20 keV の硬 X 線でフォトンファクトリーと同程度の輝度に最も多くのニーズがあり、それより低エネルギー側にも広いニーズが見られます。さらに高エネルギーと高輝度へのニーズもありますが、いつでも利用可能なように先ず安定した運転が望まれています。そこで下記の基本性能を定めて SR 発生装置の設計を行ないました。

- ① 蓄積リングは偏向磁石を主な光源とし、挿入光源も設置可能、周長110 m 以内で安定な運転ができるものとする。
  - ② 偏向磁石光源は臨界エネルギー 4 keV、輝度  $10^{13}$  photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%B.W. 以上とする。
  - ③ 挿入光源は  $10^{16}$  以上の輝度を出せるアンジュレータ、高エネルギーで高輝度を出せるウィグラー等を設置できるものとする。
- (2) 実験ステーション (ES)・ビームライン (BL) 利用テーマへのニーズは、**Fig. 1** に記載した通りで、

\* 日本 SOR (株)技術企画部 〒151-8570 東京都渋谷区駄千駄ヶ谷 4-6-15  
TEL 03-3796-2278 FAX 03-3796-2472 e-mail jsor-req@po.iijnet.or.jp

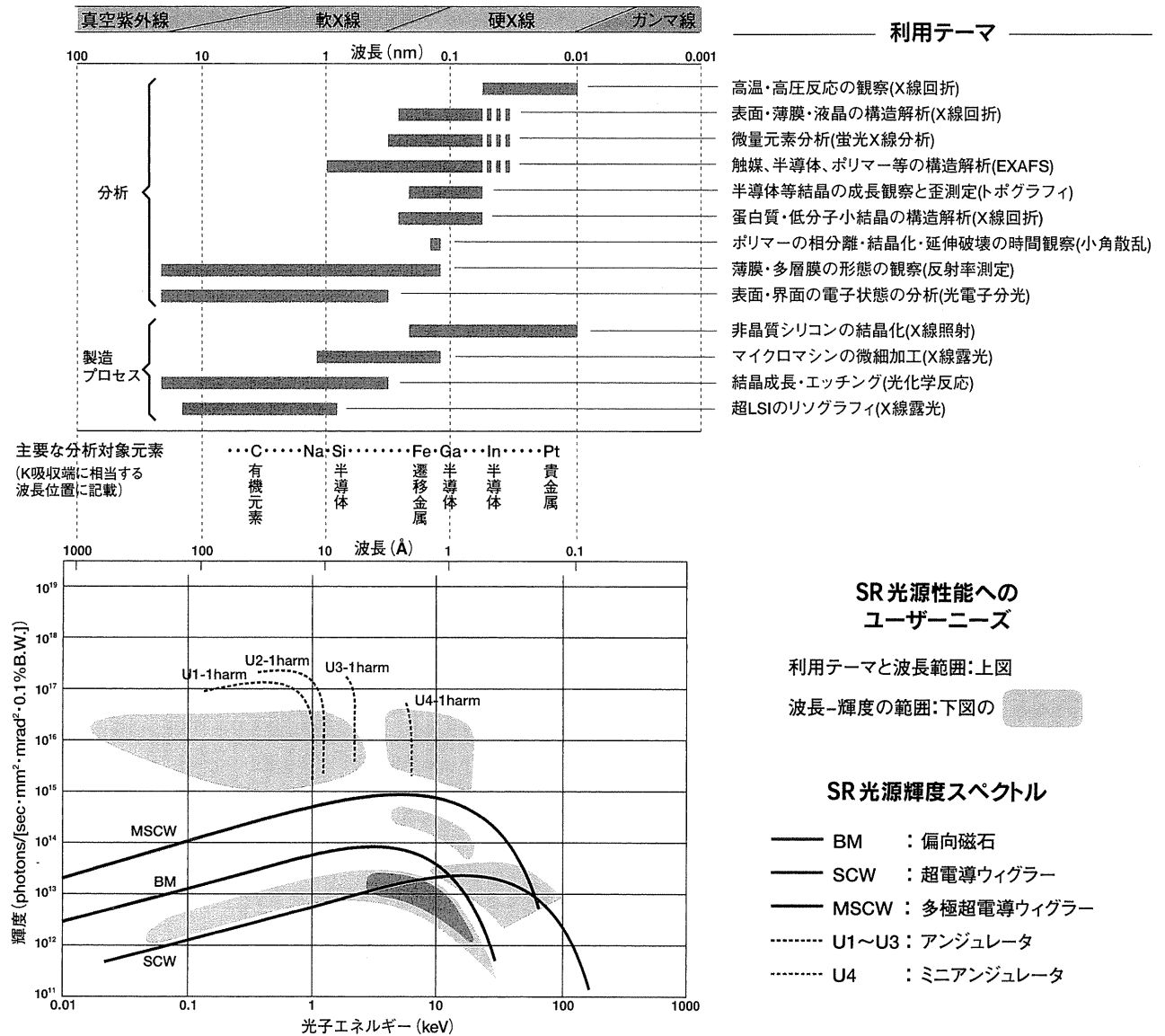


Figure 1. User needs to SR light source performance and brilliance spectra of the Nano-Hana SR light source.

それらの装置が Labo-X 線装置と同様の使い易いものが求められています。これらを満足するよう ES を整備します。

(3) 実験支援設備

実験装置の保管，試料の準備，化学物質（特殊材料ガスを含む）の自由な取り扱い，クリーンな測定環境の整備，データ解析（ソフトも整備）等ができる実験支援設備の充実が求められています。これらのニーズに応えられるよう整備します。

その他，SR 施設は首都圏内にはしいというニーズに応え，なのはな SR 施設は千葉県内に立地する予定です。

2.2 運営方針

運営面では，利用に関するコンサルや技術指導，分析委託，企業機密の保全，利用の必要性が生じた時から利用結

果が出るまでの期間（ターンアラウンドタイム）の短縮，測定データの信頼性確保，等のニーズがあります。

なのはなは，下記の方針に基づきユーザーフレンドリーな運営を行ないます。

(1) 多様な利用方式

- ① 一般利用方式：施設側で所有する ES・BL をユーザーが借用して利用する方式。
- ② 特別利用方式：緊急に利用したいユーザーが短い待ち時間で利用できる方式。
- ③ BL 保有利用方式：ユーザーが BL・ES を所有して利用する方式。

分析委託は分析受託会社を通じて利用できます。

(2) タイムリーな施設利用

利用申し込みは随時受付け，申し込みから利用までの期間や本実験開始までの準備・調整時間の短縮を図ります。

## (3) 分析結果の信頼性確保

- ES・BL にオペレータを配置し、解析専門家を常駐させます。
- 標準試料、クリーン環境を整備します。

## (4) 技術支援

SR 利用に関するコンサルや種々の技術指導を行ないます。

## (5) 機密保全

- 申請時の審査や成果公表義務を設けません。
- 実験時の機密も必要に応じて保全します。

## 3. SR 発生装置

## 3.1 SR 発生装置の基本仕様

定められた基本性能に基づき下記の設計を行ないました。

## (1) SR 発生装置の構成

SR 発生装置は、2 段の入射系加速器 (ライナック [50 MeV] とブースターシンクロトロン [500 MeV]) および蓄積リング [2 GeV] から構成されます。電子ビームは蓄積リングに 500 MeV で低エネルギー入射した後、さらに加速されて 2 GeV で蓄積運転されます (Fig. 2)。

## (2) 蓄積リング

蓄積リングのラティスは、Chasman-Green の 8 回対称です。各ラティスセルは、偏向磁石 2 台、四極磁石 5 台、六極磁石 3 台と、4.5 m の直線部からなります。直線部 8 ヶ所のうち入射セプタム用 1 ヶ所と RF 加速空洞用 1 ヶ所を除く 6 ヶ所に挿入光源を設置することが可能です。蓄積リングのその他のパラメータを Table 1 に掲載します。

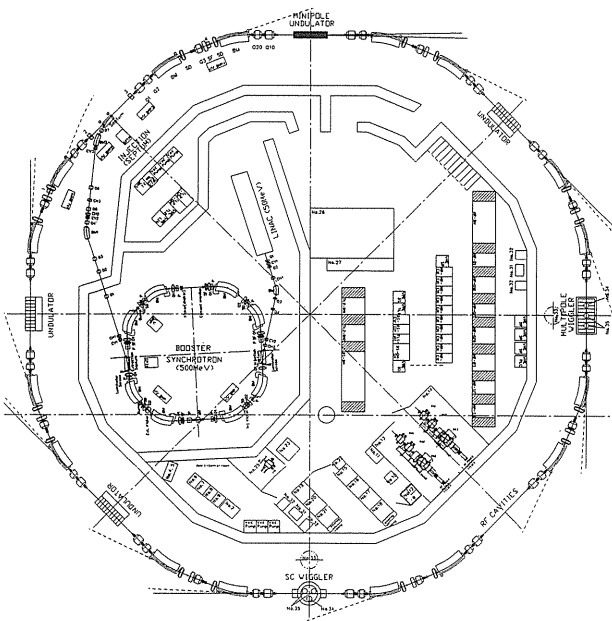


Figure 2. Storage ring and Injector.

Table 1. Parameter of the storage ring

Circumference	107.5 m
Electron Energy	2.0 GeV
Electron current	300 mA
Beam lifetime	> 10 h
Natural emittance	66.4 nm-rad
Radio frequency	178.5 MHz

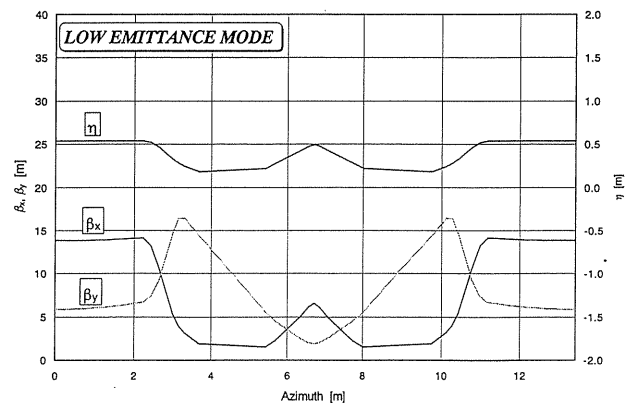
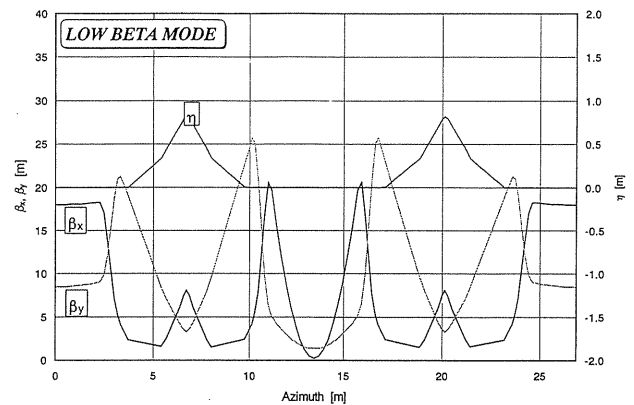
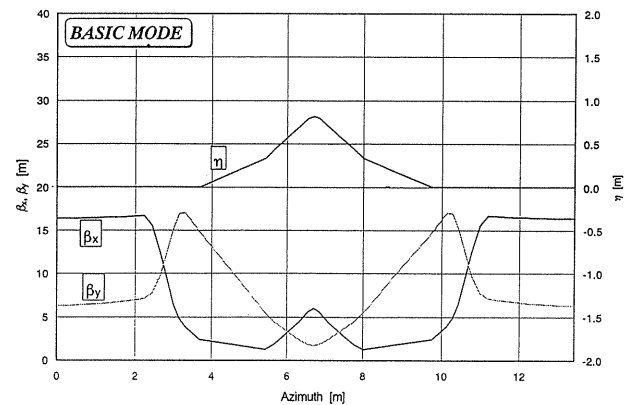


Figure 3. Lattice function of the storage ring. (a) Basic Mode, (b) Low Beta Mode, (c) Low Emittance Mode.

ラティスは、四極磁石と六極磁石の磁場を調整することにより3種類の運転モードに対応可能です。

① 基本モード (Basic Mode)

ビーム収束が緩く、試運転や調整が容易です。

$\epsilon=66.4 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ 。通常の運転モード (Fig. 3(a))。

② 低ベータモード (Low Beta Mode)

ウィグラーやミニアンジュレータを設置する際に電子ビームダイナミクスへの影響を減らすため、8ヶ所の直線部のうち4ヶ所のベータ関数を小さくします。

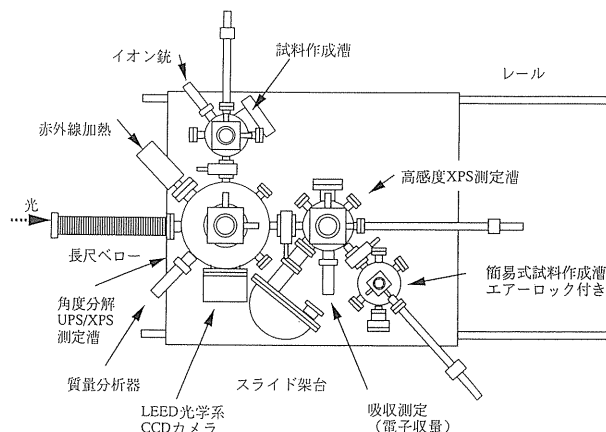


Table 2. End Stations to be equipped at commencement of the facility

No.	Kind of End Station
1	Total Reflection X-ray Fluorescence Analysis
2	Topography & Reflectivity Measurement
3	XAFS & X-ray Fluorescence Analysis (5~23 keV)
4	XAFS & X-ray Fluorescence Analysis (1.76~5 keV)
5	X-ray Single Crystal Structure Analysis
6	XPS, UPS, ARUPS, ARXPS & Soft X-ray XAFS
7	Ultra-LSI Lithography
8	LIGA Process

Figure 4. Schematic drawing of the end station No. 6 for XPS, UPS, ARUPS, & Soft-X-ray XAFS.

$\epsilon=52.4 \text{ nm}\cdot\text{rad}$  (Fig. 3(b))。

③ 低エミッタンスモード (Low Emittance Mode)

直線部の分散関数を0以外の適切な値に調整することにより、水平エミッタンスを最小化できます。

$\epsilon=27.4 \text{ nm}\cdot\text{rad}$  (Fig. 3(c))。

Table 3 Applications and performances of the end stations for analysis

No.	分析法	用途	性能
1	全反射蛍光 X 線分析	シリコンウェハ表面汚染物質とその他超微量元素の検出。	検出下限は S~Zn で $10^8 \text{ atoms/cm}^2$ 以下を, Na, Al, P では $10^9 \text{ atoms/cm}^2$ 以下。試料表面の $20 \text{ cm}^2$ の一括検出と $1 \text{ cm}^2$ 毎のマッピング。クリーン環境 (クラス100)
2	トポグラフィ	ウェハ結晶格子欠陥の測定。反射トポ。透過トポ。白色トポ。	格子歪み測定限界 $10^{-7}$ 。一括撮像寸法 $20 \text{ cm}^2$ 。クリーン環境 (クラス10000)。
	反射率測定	ウェハ, CD, HD 等の薄膜の膜厚・密度・凹凸の測定	$10 \text{ \AA}$ 以下の単層膜や 7~8 層の多層膜。
3	XAFS	重元素周囲の構造解析, 酸化数・化学状態分析	測定可能元素は V~Ru (K 吸収端) あるいは Cs~U (L 吸収端)
	蛍光 X 線分析	バルク中の重元素微量成分の非破壊分析。	対象元素は上欄と同様。深さ方向分析。
4	XAFS	軽元素周囲の構造解析, 酸化数・化学状態分析	測定可能元素は Si~Ca (K 吸収端) あるいは Rb~I (L 吸収端)。
	蛍光 X 線分析	バルク中の軽元素微量成分の非破壊分析。	対象元素は上欄と同様。深さ方向分析。
5	X 線単結晶構造解析	蛋白質 (分子量数10万)・低分子 (分子量数 100~数千) の構造解析。	エネルギーは $12.4 \text{ keV}$ に固定。IP による高感度測定と CCD によるデータ良否の早期判定。
	小角散乱	ポリマー ( $100 \text{ \AA}$ 以上の長周期構造) の延伸による構造変化等の観察。	
6	X 線光電子分光 (XPS)	表面元素分析, 化学結合状態分析, 表面の化学変化の追跡, 表面マッピング	エネルギー範囲 $1000 \text{ eV}$ 以下。表面マッピング ( $10 \mu\text{m}$ 以下の分解能) と数 $10 \mu\text{m}$ 領域の局所光電子スペクトル。
	紫外線光電子分光 (UPS)	電子状態の詳細分析 (エネルギーバンドのマッピング等)	約 $100 \text{ eV}$ 以下。同上。
	角度分解光電子分光 (UPS/XPS)	分子配向角度の決定。	数 $10 \sim 1000 \text{ eV}$ 。
	軟 X 線 XAFS	有機物等軽元素 (C, N, O, F など) 周囲の構造解析, 酸化数・化学状態の分析。化学結合の空間的方向。	対象元素は B~F [ $100 \sim 800 \text{ eV}$ ]。

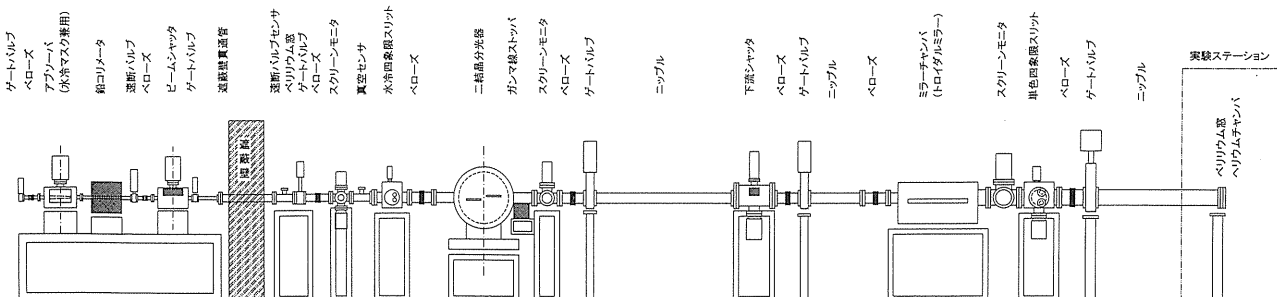


Figure 5. Schematic drawing of the beamline for Hard X-ray.

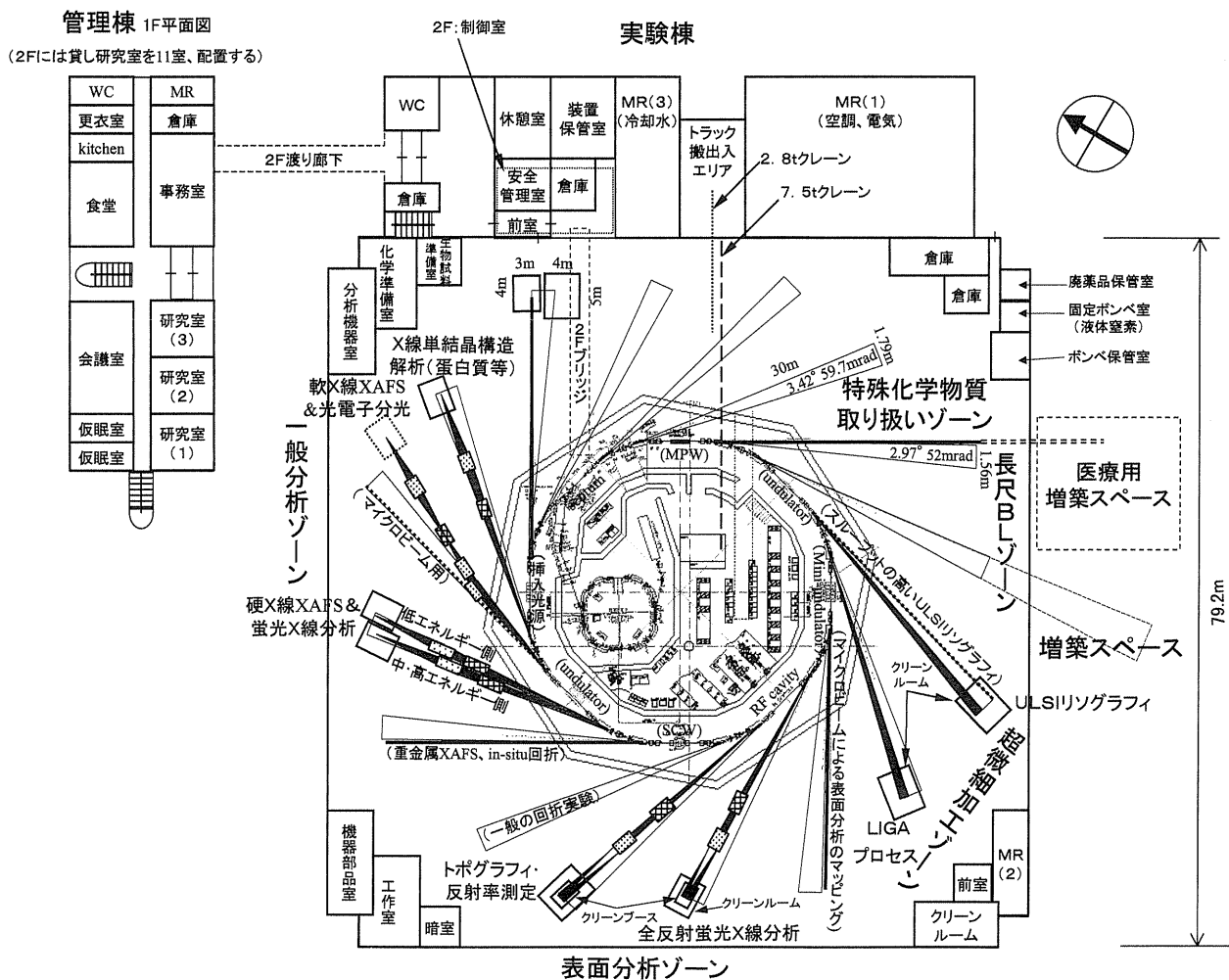


Figure 6. Layout of the Nano-Hana SR facility.

3.2 SR 光源

前記の設計により, 下記の光源が可能になりました。

- ① 偏向磁石光源: 臨界エネルギー 4 keV の連続スペクトル SR を発生する偏向磁石が16台。
- ② 挿入光源: アンジュレータ, ミニアンジュレータ, ウィグラー, 多極ウィグラーを設置することが可能。(ただし, 後3者は低ベータモードでベータ関数が小

さくなる4つの直線部にのみ設置可能)

これらの輝度スペクトルを Fig. 1 に重ねて表示しました。

4. 実験ステーション・ビームライン

4.1 実験ステーション (ES)

なのはな SR 施設では, 全体で32本程度の BL の設置が可能ですが, 操業開始当初には Table 2 の8つの ES・

