

動向

ニュースバル計画

安東 愛之輔 (姫路工業大学高度産業科学技術研究所/SPring-8)

はじめに

“スバル”と聞けば最近の方は大型望遠鏡を思い浮かべられるでしょう。或いは若干古典になじみのある方は清少納言に思いを馳せられるかもしれません。ニュースバル計画は、姫路工業大学がコンパクトな軟X線源を目指した“スバル”計画を、SPring-8の西播磨誘致決定後そのLINACを入射器とする新しい計画へ発展させたものです。斯く言う私もこのことを知ったのは、わずか半年前のことです。本計画に私が関与するようになったのは、2年前高度産業科学技術研究所(高度研)の前ならびに現所長である宇山、寺澤の両氏が、やっとアプローチ道路が完成したばかりのSPring-8の、建築飯場を流用したプレハブ2階へ見えられたときからです。自分がこの計画の当事者になると分かっておればもっと“まじめに”対応していたものにと、反省している今日この頃です。

本計画の加速器本体と建て屋の予算はすでに兵庫県議会の承認を受け、日本原子力研究所、理化学研究所及び高輝度光科学研究センターの全面的な支援と協力の下、1998年3月末までにハードウェアを完成させることになっています。

位置づけ

高度研の中心的課題は、光科学技術を中心とした先端科学技術の研究と共に兵庫県下企業等との共同研究等による新産業技術基盤の創出をはかり、産業支援を行うことにあります。また、姫路工業大学の研究教育活動に支えられて、科学技術

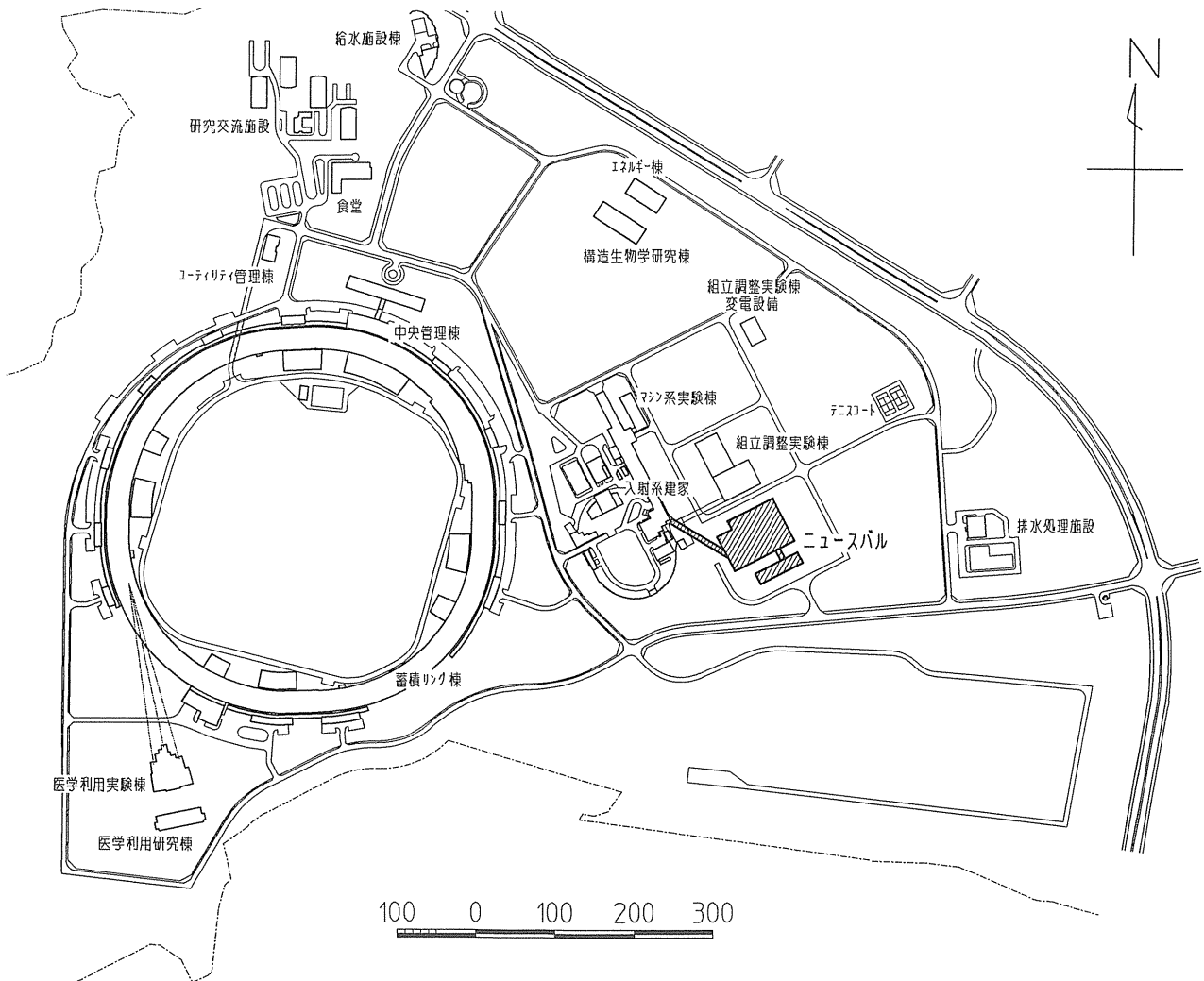
の高度化にイニシアチブを発揮した光科学技術のセンター・オブ・エクセレンスとならんことが期待されています。ニュースバルはこの高度研の付属研究施設として、人材育成と新技術開発の核となるわけですが、これによる研究は次のような課題を掲げています。

1. 光源の開発研究

- (1) 軟X線から真空紫外線領域における高輝度放射光の発生及び光源の小型化、低価格化を目的とした基礎応用研究。
- (2) 強力な紫外光FELの実現やコヒーレントな軟X線ビームの発生の研究。またスーパーキャビティを利用したコンプトン散乱光発生の実現。
- (3) 光の高輝度化、短波長化を目的として、電子ビームの冷却や極短バンチの実現を目指した研究と、低エミッタンス、マイクロ・サイズ、微小エネルギー幅の高品質電子ビームの生成。

2. 産業応用研究

- (1) 50 nm以下のX線による縮小露光リソグラフィ技術の確立や数百ミクロン・レベルの3次元微細加工など光微細加工技術の研究。
- (2) 極微小分析などによる物質評価技術やX線による選択的反応等による物質の創製技術、またこれらを基礎にした新素材開発に貢献する。
- (3) 分解能10 nmレベルのX線顕微鏡等によるバイオ計測技術の研究。



ニュースバル蓄積リング

蓄積リングの模式的平面図と主要パラメータは図及び表に示す通りです。リング本体は約42 mW×30 mHのレーストラック型でSPring-8のLINACを入射器とします。ビームラインは当面、約30 mを8本(図中の一点鎖線)建設します。実験室を含めた全体の大きさはほぼ86 m×63 mとなります。

蓄積リングの自然エミッタンスの理論的最小値は、

$$\varepsilon(\text{nm}) = (2\sim 3) \times 10^4 E^2(\text{GeV}) / N^3$$

で与えられます。ここに E は電子ビームのエネルギー、 N は偏向磁石の台数です。実際に可能な値はこれの更に2~3倍となります。DBA (Double Bend Achromat) Latticeですと $N=2/\text{セル}$ です。数GeVクラスではセル当たりの長さは最低10 m必要です。周長を100 m程度に限り

ますと、10セル即ち $N=20$ が最大でしょう。従ってこの周長では、可能な理論的最小自然エミッタンスは1 GeVで3~4 nm (1.5 GeVで6~8 nm) となります。ニュースバルでは15 mの長直線部を2箇所設け周長を約120 mとし、自然エミッタンスは30 nm@1 GeVとしました。即ち直線部を犠牲にして低エミッタンスを目指しても表に示す値の精々1/5程度にしかならないからです。輝度の落ちは電流値と実験時間で補うことにします。数nm@数GeVは周長300~400 mのマシンで実現されるべきものと考えました。このスバル自身で低エミッタンス化を目指すよりは、前述の光源の開発研究により適したもの、更に上記の理論的最小値を打ち破るような研究のできる加速器にしました。即ち、

- (1) 周長に比べ非常に長い直線部 (15 m) 2カ所

(2) 逆方向偏向磁石の導入により、他パラメータの大きな変動なしに、モーメンタム・コンパクトション・ファクター (α_p) が自由に変えられる

また補正要素や高次磁場成分の追加、粒子光学の多様な運転モードへの対応や変更が無理なくできるよう注意を払いました。私事ながら α_p には思い入れがあります。14年前 Fermilab 反陽子源計画では生成直後の反陽子のバンチ・ローテーションに微小な α_p が不可欠でしたが、Lee Teng から高次の項が問題となりビームが回らないぞ、どうするのかと提起されその解決法を見いだしました。また KEK-12 GeV-PS (プロトン・シンクロトロン) でトランジション・エネルギーに絡む諸問題を克服するため $\alpha_p < 0$ を提案しましたが実現できませんでした。 α_p のエネルギー・時間空間での役割は、いわばベータトロン振動での四極磁石の磁場勾配に対応します。 α_p が小さくなるということは線形収束力が無くなり非線形力が

主となります。磁場勾配の正負で運動が大きく変わるように、 α_p の正負でビーム不安定性の現れ方や影響が根本的に変わります。これは電子ビームのバンチ長を可能な限り短くして行く上で大変重要な役割を果たすだけでなく、蓄積リング中でのビーム・ダイナミクス、特に高品質ビーム実現へ重要な知見をもたらします。逆方向偏向磁石の導入は分子研の濱さんとの議論を通して最終的に決断しました。

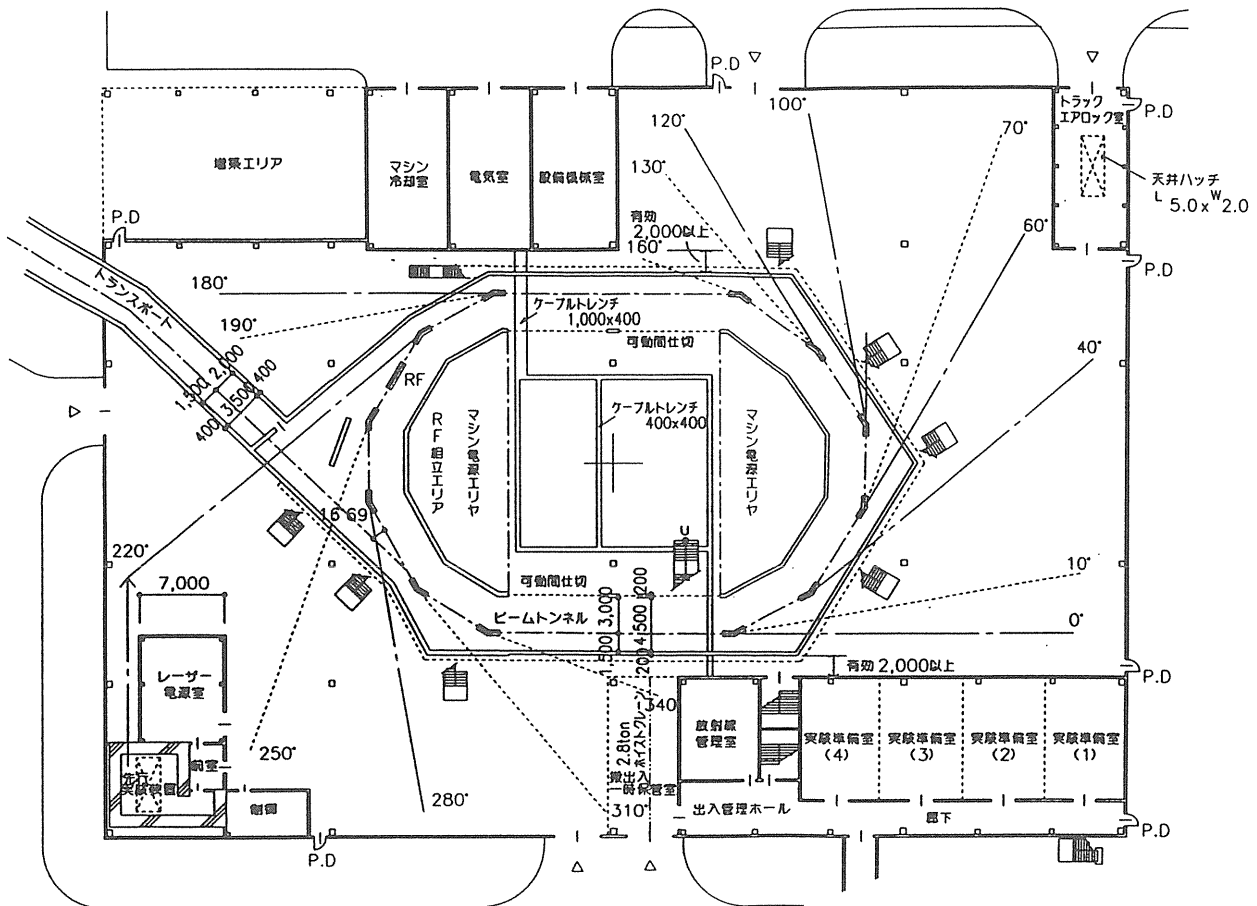
ビーム・ライン

現在計画されているビーム・ラインは以下の通りです (詳細未定、あくまでもガイド・ラインとして)。

挿入光源

~3 m 程度のアンジュレータ :

周期長	周期数
~6 cm	50
1 GeV	1.5 GeV



基本波 (K=1) 106 237 eV
Brilliance 5×10^{16} 10^{17}

photons/sec/mm²/mrad²/0.1%

～12 m 程度のアンジュレータ :

(詳細目下検討中)

超伝導ウィグラー :

8 T, 3 極, $\sim 10^{13}$

(33-keV-photons/sec/mrad@1.5 GeV)

200 nm-FEL (オプティカル・クライストロン) :

平均出力数 W 以上@1 GeV

偏向電磁石 (10° 偏向点) :

4×10^{13} photons/sec/mm²/mrad²/0.1%

(@1.5 GeV), 2 カ所

7×10^{13} photons/sec/mm²/mrad²/0.1%

(@1.5 GeV), 2 カ所

ユーザーの方からエミッタンスはいくらだ、小さくなければダメだとよく言われます。これは加速器サイドから見て理解できません。思うに必要な量は、考えている資料の断面積と立体角の中に毎秒いくらの光子が来るか、ということの筈です。これはノイズとの関係から必要最低限の数があり、また可能な照射時間からも決まる量です。途中の光学系での損失を見込んで光源の必要量がでます。加速器サイドではこの観点から Brilliance を問題としています。従って光源サイズが 1/10 に成ることと電流値が 10 倍に上がることは同値です。後者ではコリメータ等での熱負荷の絶対量は増えますが、断面積当たりでは基本的に同じではないでしょうか。

おわりに

ニュースバルは国内外の数多くある軟 X 線、真空紫外領域の光源計画の中で、兵庫県というローカル政府が財政支出し、SPring-8 という高輝度 X 線光源と同一の場所に設置が決まった、良い意味での“特異”な装置です。SPring-8 とニュースバルの特徴を考え、一方で有利に展開できることを他方で無理に行う必要はありません。ま

た設置者が誰であるにせよ客観的にみれば、特に海外からみれば Spring-8 全体として認識されず。真空紫外から硬 X 線までの放射光施設複合体として、利用から光源の高度化まで総合的に一体となって、追及して行くことが重要であり、また我々に課せられている重要な任務に違いありません。

表 ニュースバル主要パラメータ

基本パラメータ	
入射エネルギー	1 GeV
定常運転エネルギー	1.5 GeV
蓄積電流	500 mA
周長	～118 m
周回周波数	～2.5 MHz
直線部	4 m × 4 カ所
長直線部	～15 m × 2 カ所
ベータトロン振動数 (水平/垂直方向)	6.21/2.17
モメンタム・コンパクション・ ファクター	±0.001 (可変)
加速時間	5 分程度以内
入射方式	シングル・パルス入射 (約100回程度)
定常運転時の主要パラメータ (1.5 GeV)	
自然エミッタンス	67 πnm
ベータトロン振動結合度	10%
偏向磁石磁場	1.55 T
偏向磁石からの放射の	
臨界波長	0.53 nm
臨界エネルギー	2.33 keV
周回あたりの偏向磁石による 放射損失	176 keV
放射減衰時間 (縦方向)	3.41 msec
(水平方向)	6.55 msec
(垂直方向)	6.73 msec
自然エネルギー幅	0.072%
高周波電圧	250 kV (最大～500)
ハーモニック・ナンバー	198
周波数	500 MHz
バケット・ハイト	0.93%
シンクロトロン振動数	0.00188
バンチ長	6.76 mm
Toushek 寿命	10時間以上 (500 mA, 100バンチ)