

SPring-8 High Flux Ring 計画加速器検討書

October 29, 2003

米原 博人、伊達 伸、早乙女 光一、大島 隆、熊谷 教孝

(財)高輝度光科学研究センター

加速器部門

Study of SPring-8 High-Flux Ring Project

October 29, 2003

Hiroto YONEHARA, Schin DATÉ, Kouichi SOUTOME,

Takashi OHSHIMA, Noritaka KUMAGAI

Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Accelerator Division

SPring-8 High Flux Ring 計画加速器検討書

SPring-8 将来計画を検討する上で、我々は現在の加速器を設計・建設し、ビーム性能の向上を行っている立場から、加速器を中心に据え、現在の関連する分野、或いは新分野開拓を眺みながら計画を検討した。蓄積リング型放射光施設として、次世代放射光源の定義が出ないこと、現有の放射光利用実験者から放射光性能に対する根拠のある要請がないことから、加速器の性能を放射光利用研究から求めることができない。このため本計画の骨子は、本文中にも記載しているが、従来の放射光利用を主眼としていないが、本研究センタの設置来歴から、光子利用に主眼を置いた。新規利用者の拡大を目指し、外部レーザー光と蓄積電子ビームとのコンプトン散乱により得られる GeV 線、MeV 線及び超伝導電磁石による高エネルギー放射光を生成し、実験研究への利用と、このような光子により陽電子・中性子を生成し、利用研究に供する新しい蓄積リングを計画した。このような検討と並行して、10 T 超伝導電磁石を SPring-8 蓄積リングに設置しビーム試験を行った結果を外部研究者にも公表し、得られる高エネルギー放射光の利用検討を行った。検討を通して、既存の放射光より遥に高いエネルギーを持つ光子を、従来の物性研究の延長上に置き利用研究の可能性があること、また放射光施設にとっては新分野と思われる天体核物理、原子核準位観測などへの具体的実験計画が作られるに至っている。これらを使用した研究テーマは、別途 SPring-8 蓄積リングの専用施設設置計画趣意書の形で提案する準備を行っている最中である。趣意書の中では、既存の放射光利用者へ配慮しないと実現に困難を伴いそうであるので、非常に限定した利用方案となっているが、発展的に考えた場合、本 HFR 計画の研究テーマとして取り上げるに値する研究的価値を持っている。

本計画のような Big Project を提案する場合、上記したような研究テーマだけではなく、もっと多くの研究テーマを持つべきである。もともと本書は、加速器側から実験研究者に環境を提示し、本来の計画提案書作成に賛同を得、利用実験の研究テーマ・研究計画を各々の物理・物性の研究者を始め、多方面にわたる分野の研究者に持ち寄ってもらうことを目的に作成した。しかし、検討を進める上で検討内容を公式に広く周知しなくてはならない事情が生じたため、現状のまま、幾つか具体的研究テーマを挙げるができる状況になっているにも係わらず、従来のまま、内容を改訂しないで、“SPring-8 HFR 計画加速器検討書”として公表する。

本文中に記載しているように、利用分野拡大を狙った本計画は 1999 年 5 月から始め、すぐに JASRI 加速器部門内で検討を行うことのできることを得ているが、準備室設立のような活動を公式に認めるような措置は未だとられていない。

SPring-8 で現有しているブースタ・シンクロトロンを、ブースタとして使用していない時間帯に利用できるように、このような計画に合わせた改造を考慮したこともあるが、既存の周長 400 m は 8 GeV 蓄積リングとするには無理があり最適設計ができないこと、規定の加速器設備の運転時間を損なうことなく改造を施すことはほとんど不可能であること、8 GeV リングとして本格的な実験に使用するための変更は改造の域を脱しており全面的に作り変えるに等しく、そこまでやっても最適設計ができないため 2 流の性能にしかならないと懸念されること等の理由から、新蓄積リング建設計画とした。

SPring-8 High Flux Ring 計画

January 5, 1999 米原

改定 ; January 18, 1999 米原、伊達、早乙女

Version 2; February 12, 1999. Version 3; June 03, 1999. Ver.4; 2003/05/16

1. 概論

SPring-8 将来計画に、超伝導磁場による高エネルギー放射光、レーザー電子光及び中性子・陽電子発生専用の蓄積リングを提案する。

中性子は電荷を持たないことから、放射光と比較できるプローブとなるため、相補的に実験に利用できることが必要であると聞く。このような低速中性子は、20 MeV 程度のガンマ線をターゲットに照射し、巨大共鳴核反応により得ることができる。このようなガンマ線は波長 40 μm 程度のレーザーを種にして、8 GeV の電子ビームに対するレーザー電子光として得られる。

SPring-8 の将来計画であるので、放射光を介在させる加速器計画とした。放射光を介在させて、陽電子、中性子を生成し、プローブとして使用することは、radiation hazard の低減、target 残留放射能レベルの抑制、target の消耗がほとんどないので長時間使用が可能、バンチ構造に基づく時間構造および時間分解能が得られることなどが利点として考えられる。さらに、入射器として現在稼働中のリナック及びシンクロトロンの電子ビームを利用することができれば、入射器の建設費用は考慮しなくてもよいことになり、既存の敷地内に立地する大きなメリットとなる。

既存の入射器で利用できる電子ビーム*は、8 GeV まで(実用上 3 GeV 以上)の Full Energy Injection が可能である。ビーム強度は Bunch Train に従って、最大出力電流 7.6 mA (シンクロトロン DCCT) まで使用できる。リナックのマクロバンチ長に応じて、

~1 μs Macro Bunch	7.6	mA; $N = 6.20 \times 10^{10}$ (e^-/s)
	2	mA; $N = 1.63 \times 10^{10}$ (e^-/s)
40 ns Macro Bunch	0.725	mA; $N = 5.91 \times 10^9$ (e^-/s) (StR. DCCT 換算 0.38 mA)
Single Bunch (1 pps)	1.0	mA; $N = 8.26 \times 10^9$ (e^-/s) (StR. DCCT 換算 0.53 mA)
Single Bunch (8 pps)		テスト未完了。

各々の電子ビームをシンクロトロンから供給することができる。

* 陽電子ビームも使用可能な設計となっはいるが、SPring-8 蓄積リングへの入射条件と共存させるためにはかなり手をいれなくてはならないので、当面不可として議論する

SPring-8 蓄積リングは低エミッタンス化を目指しており、この方向で放射光利用実験が順調に進んでいる。このような時、レーザー電子光・超伝導ウィグラ等を附加していくことは、利用者層の拡大となり SPring-8 運営上からは望ましいことではある。しかし、従来から蓄積した

電子ビームの低エミッタンス化を押し進めている放射光専用リングの性格からは、このような挿入光源を設置することは低エミッタンス化指向とは反しており、低エミッタンス電子ビームによる放射光を求める運転からは離れていくことになる。さらに、レーザ電子光・超伝導ウィグラによるビーム強度の減衰は、従来の放射光利用者にとってビーム寿命の減少となり、実験上、好ましくない。十分なビーム強度とビームの減衰に留意することなく必要な光子数を得るために、上記蓄積リングを新たに建設する。既設シンクロトロン⁸の 8 GeV 電子ビームを利用することを前提とすると、周長 740 m 程度となり、加速周波数は、シンクロトロン、蓄積リングと同じく、508.58 MHz を選ぶと、Harmonic No. 1,260、周回周波数 404 kHz となる。回転周期は、2.48 μ s であるから、得られるレーザ電子光、陽電子、中性子などは、最大周期間隔 2.48 μ s のバーストビームとして得られる。

注； Cool down して e^+ , N を使用することが多く、バンチ構造による時間分割は意義をなさない。

このリングでは、低エミッタンスである必要はない。低エミッタンスである方が、発光点が局在化されることになり何かと都合はいいが、元々電子ビームのエミッタンスは、ハドロンビームに比べて小さいことから、このことが本質的な問題とはならない。このことから、SPring-8 蓄積リングより多少多めの電子数を 1 バンチに入れても問題は少ないであろうから、1 バンチに 5.98×10^{10} 個の電子 (DCCT 3.87 mA に相当する) をいれても実用的ビーム寿命は確保されるだろう。この電子数は、SPring-8 蓄積リングでは、2 mA に相当する。最短時間間隔はバンチ間隔で、加速周波数 508.58 MHz から決まり、1.966 ns である。この場合には、全蓄積電流値 (申請) を 1 A とすると、0.79 mA/Bunch (= 1.22×10^{10} e^- /Bunch, Total; 1.55×10^{13} e^-) となる。

次に、このような時間構造を持たせた、404 kHz 繰り返しバンチ状 (5.98×10^{10} 個) の電子から得られる陽電子、中性子数を評価する。

2. 陽電子生成

陽電子を超伝導ウィグラ (8 T) で得られる高エネルギー放射光 (Critical Wavelength; 0.340 MeV) による対生成で得ようとする試みが SPring-8 ($E_c = 8$ GeV) でも検討されている。

以下、超伝導ウィグラ放射光により得られる陽電子生成量の評価を示し、その後、本加速器計画により得られると期待される陽電子生成量について述べる。^{Ref.1}

1) 超伝導ウィグラによる陽電子生成

超伝導ウィグラの central pole から発生する photon Flux $F(\omega)$ は、ビーム電流 100 mA 及び orbit arc 1 mrad に対して、

$$F[\text{photons/s/ } 0.1\% \text{BW/100 mA/mrad}]$$

$$= \frac{1}{\hbar \omega} \times \frac{0.1}{100} \omega \times \frac{0.1}{1.602 \times 10^{-19}} \times \frac{10^{-3}}{2\pi} \times \frac{\sqrt{3} e^2 \gamma}{c} \frac{\omega}{\omega_c} \int_0^{\infty} K_{5/3}(x) dx$$

$$= 1.256 \times 10^9 \times \gamma \frac{\omega}{\omega_c} \int_{\omega/\omega_c}^{\infty} K_{5/3}(x) dx$$

で与えられる。 ω_c はウィグラから放出される放射光の critical-photon frequency であり、

$$\omega_c \equiv \frac{3}{2} \gamma^3 \frac{c}{\rho}$$

である。例えば、磁場の強さが 8 T なら $\omega_c = 0.340$ [MeV] である。この式の積分形は、

$$\int_x^{\infty} K_\nu(\eta) d\eta = h \left\{ \frac{e^{-x}}{2} + \sum_{r=1}^{\infty} e^{-x \cosh(rh)} \frac{\cosh(rh)}{\cosh(rh)} \right\}$$

と近似できるので、 $h=0.5$ 、 r の次数は $r=1$ の時に比べて無視できる次数までとる。このようにして Photon Flux $F(\omega)$ を求めることができ、その結果を図 1 に示す。

Photon を Tungsten slab に垂直に入射し生成される陽電子数は EGS4 により評価できる。ただし、発生した陽電子を最後 (slab の外) まで追うことはできないので、以下では slow positron への変換効率 κ_{slow} を slab の厚さによらず一定と仮定する。 κ_{slow} は 10^{-4} 程度の値である。この値は、 β^+ 崩壊性同位元素で生じた β^+ 線の slow positron への変換効率が 10^{-4} であることに基づいている。陽電子の生成率は、Tungsten slab の厚さに依存しており、Photon Energy に対して図 2 に示すように変化する。

図 2 に示した陽電子生成率を $\kappa(\omega)$ とすると、最終的に得られる slow positron の個数 N は、ビーム電流及び orbit arc 1 mrad 当たり、

$$N[\text{positrons/s/100mA/mrad}] = \kappa_{\text{slow}} \int \kappa(\omega) \frac{F(\omega)}{0.1\omega/100} d\omega$$

となる。いくつかの Tungsten slab の厚さについて右辺の被積分関数 $\kappa(\omega)F(\omega)/(0.1\omega/100)$ を図 3 に示す。Electron Energy; 8 GeV ~ 18 GeV, Tungsten Slab の厚さについて、このようにして求めた slow positron 生成効率 $N[\text{positrons/s/100mA/mrad}]$ を表 1 に示す。8 GeV, 100 mA, 8 T, 1 mrad では、毎秒 10^9 個程度の slow positron yield が期待できる。^{Ref.1} 従って、単バンチビーム (5.98×10^{10} electrons; 蓄積電流換算値 3.87 mA) 当たり期待できる陽電子量は、95 個、繰返周期 2.48 μs のパースト状となる。1 秒間では 3.87×10^7 個の陽電子数となる。

ウィグラ磁場分布は、ウィグラが挿入光源であることから、最大磁場を持つ正弦波状の分布に設計する。高いエネルギーを持つ放射光を得るために最大磁場分布を広く利用するために、ビーム初期起動・調整運転終了後、ラティス偏向電磁石の一台を $B \cdot ds$ を保ったまま超伝導偏向電磁石に置き換える。例えば、偏向電磁石 64 台 (現 SPring-8 Booster-Synchrotron) を用いて HFR を構成したとすると、1 台当たりの偏向角は 49 mrad である。この偏向角は、当然、超伝導偏向電磁石に置き換えても保持されることになり、このうちの約 40% に当たる 20 mrad を陽電子生成に利用することができれば、上と同じ条件で、単バンチビーム (5.98×10^{10} electrons; 蓄

積電流換算値 3.87 mA) 当たり期待できる陽電子量は、1,900 個、繰返周期 2.48 μ s のバースト状となる。1 秒間では 9.76×10^8 個の陽電子数となる。この陽電子生成期待値は、現在 SPring-8 蓄積リングの超伝導ウィグラ放射光による生成陽電子利用計画で期待されている生成量 “SPring-8 storage-ring positron 計画 ; 8 GeV, 100 mA, 8T-SCW ; 1 mrad ” に匹敵している。最大蓄積電流 1 A では、1 秒間に約 200 倍の

$$1,900 \times 200 = 3.8 \times 10^5 \quad e^+/\text{秒}$$

が期待できる。

開き角 20 mrad を持ち出てくる放射光は、リング本体室でターゲットに照射するとし、発光点からの距離を 10 m と仮定すると、

$$10 \text{ m} \times 20 \text{ mrad} = 200 \text{ mm}$$

200 mm 長のターゲットとなり、現実的な寸法に思える。しかも、陽電子を減速する時に、この広がりには問題ではないように思える。

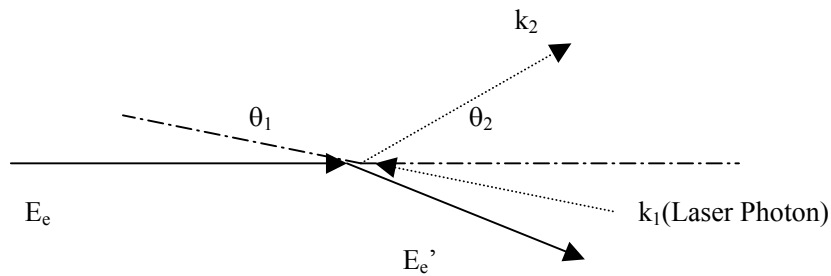
陽電子減速過程により、時間構造がなまってしまい必要な時間構造がなくなるようであれば、この利点はなくなる。

偏向電磁石 1 台当たりの偏向角を 5 度として、常伝導電磁石 0.9T と超伝導電磁石 8T を用いた場合のビーム軌道の違いを図 4 に示す。この時発生する放射光を、ビーム軌道を直線に置いた場合にその発散方向を図 5 に示す。図 4 に示されているように、超伝導偏向電磁石の有効長が短くなることから、偏向電磁石内の磁石支持材に放射光が当たることを配慮する必要がなさそうであることがわかる。さらに、磁石有効長がかなり短縮できることから、常伝導偏向電磁石の設置スペースに超伝導状態を作り出すための容器を含めて超伝導偏向電磁石を置き換えて設置できる可能性が高いことがわかる。図 5 中の中心軸からの距離(mm)からわかるように、超伝導偏向電磁石直下流の Q3, Q4 電磁石のヨーク及びこれらと次の常伝導偏向電磁石に組み込む真空槽は、超伝導偏向電磁石から発生した放射光を positron 生成用ターゲットに輸送するため、考慮が必要である。この放射光対策を行うことができれば、Q2 電磁石以降は通常のヨーク、真空槽を使用する。

3. γ 線生成

1) コンプトン散乱によるガンマ線発生

蓄積されている電子と外部レーザのコンプトン散乱により得られるガンマ線(レーザ電子光)のエネルギーの角度分布を求める。運動学から、レーザ電子光のエネルギーは、



以下の式(3-1)により求めることができる、

$$k_2 = \frac{k_1(1 - \beta \cos \theta_1)}{1 - \beta \cos \theta_2 + \frac{k_1(1 - \cos \chi)}{E_e}} \quad (3-1)$$

ここで

$$\beta = \frac{v_e}{c}$$

$$\chi = \theta_2 - \theta_1$$

電子とレーザの入射角は、ちょうど正反対向き、つまり Head-on Collision の場合のみ考えることにすると、

$$\theta_1 = \pi$$

となる。入力レーザの波長を λ (nm) とすると、このレーザ光子のエネルギー k_1 は、

$$k_1 (eV) = \frac{1,239.84244}{\lambda (nm)} \quad (3-2)$$

と表わせる。MeV 光子発生に使用できそうなレーザを表 2 に示す。例えば、CO₂ Laser 10.6 μ m の Photon Energy は、

$$k_1(eV) = \frac{1,239.842}{\lambda(nm)} = \frac{1,239.842}{10.6 \times 10^3} = 0.116966 (eV)$$

と求められる。Head-on Collision ($\theta_1 = \pi$) に限定したことにより、

$$\begin{aligned} k_2 &= \frac{k_1(1 - \beta \cos \pi)}{1 - \beta \cos \theta_2 + \frac{k_1\{1 - \beta \cos(\theta_2 - \pi)\}}{E_e}} \\ &= \frac{k_1(1 + \beta)}{1 - \beta \cos \theta_2 + \frac{k_1(1 + \cos \theta_2)}{E_e}} \end{aligned}$$

さらに、装置の配置から考えると小さな反跳角のレーザ電子光のみ使用できることを加えると、

$$\begin{aligned} \cos \theta_2 &= 1 - \frac{1}{2}\theta_2^2 \\ 1 - \beta^2 &= \frac{1}{\gamma^2} \quad \therefore \quad (1 + \beta)(1 - \beta) = \frac{1}{\gamma^2} \\ \beta &\cong 1 \end{aligned}$$

従って、

$$1 - \beta = \frac{1}{2\gamma^2}$$

と近似すると、(3-1)式は、

$$k_2 = \frac{4\gamma^2 k_1}{1 + \frac{4\gamma k_1}{m_e c^2} + \gamma^2 \theta_2^2} \quad (3-3)$$

となる。ここで、 E_e は蓄積されている電子のもつエネルギー、 m_e は電子の静止質量であり、

$$\gamma = \frac{E_e}{m_e c^2}$$

と表わせる。SPring-8を電子ビーム源と考えると、 $E_e = 8 \text{ GeV}$ であるから、

$$\gamma = \frac{8,000}{0.510999} = 15656.6$$

である。これらの値を(3-3)式に代入し、レーザ電子光の反跳角 θ_2 に対する光子エネルギーを求めた。図6参照。同様にして、レーザ波長 200 nm のレーザ電子光エネルギーの角度依存性を求めると、図7のようになる。

コンプトン散乱の微分断面積は、

$$k_2 \frac{d^3 \sigma}{d^3 k'} = \frac{3\sigma_0}{\pi} \frac{1}{(m_e c^2)^2 x} F(x, y) d \left(x + \frac{t}{(m_e c^2)^2} - y \right) \quad (3-4)$$

σ_0 ; Thomson Scatt. Cross Section = $8 \pi r_e^2 / 3 = 0.665 \text{ 246 barn}$

ここで、

$$x = 2\gamma \frac{k_1}{m_e c^2} (1 - \vec{\beta}_e \cdot \vec{e}_{k_1}) = 2\gamma \frac{k_1}{m_e c^2} (1 - \beta \cos \theta_1)$$

$$y = 2\gamma \frac{k_2}{m_e c^2} (1 - \vec{\beta}_e \cdot \vec{e}_{k_2}) = 2\gamma \frac{k_2}{m_e c^2} (1 - \beta \cos \theta_2)$$

$$F(x, y) = \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{y} \right)^2 + \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{y} \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{x}{y} + \frac{y}{x} \right)$$

この式を実験室系で、拡き角 θ_2 のコーンの積分形に直すと、

$$\int_0^{\theta_2} d\Omega_{k_2} \frac{d\sigma}{d\Omega_{k_2}} = \frac{3\sigma_0}{x^2} \int_{\frac{x}{1+x}}^{y(\theta_2)} dy F(x, y)$$

$$= \frac{3\sigma_0}{4} \left[\frac{1 + \frac{x}{2}}{\left(\frac{x}{2}\right)^3} \left\{ \frac{2\left(\frac{x}{2}\right)\left(1 + \frac{x}{2}\right)\left[1 + \frac{x}{2}(1 - \xi)\right]}{(1+x)[1+x(1-\xi)]} - \ln \frac{1+x}{1+x(1-\xi)} \right\} + \frac{1}{x} \ln \frac{1+x}{1+x(1-\xi)} - \frac{\xi}{(1+x)[1+x(1-\xi)]} \left\{ \frac{1 + 3\left(\frac{x}{2}\right)}{1+x} + \frac{x(1-\xi)\left[\frac{3}{2} + x(1-\xi)\right]}{1+x(1-\xi)} \right\} \right] \quad (3-5)$$

この式により、拡り角 θ_2 のコーン内に放出される γ 線発生の反応断面積を、レーザ波長が、10.6 μm , 200 nm の各々の場合について、図 8 と図 9 に示す。0 mrad に放出された γ 線のエネルギーは、各々113 MeV, 3.45 GeV となる。外部レーザ（波長；200 nm）を用いて、3.4 GeV までのレーザ電子光が得られる。SPring-8 蓄積リングのレーザ電子光計画と同じであるが、低エミッタンス放射光の利用者はいないため、蓄積電流値のビーム寿命時間をあまり気にする必要がないので、レーザと蓄積電子ビームとのマッチングを最大限にとれる。電子ビームの減少が問題となるならば、Top-Up Operation を実現すれば良い。

MeV ガンマ線を広い範囲で得るためには、外部レーザの波長範囲を広げることが必要であり、数 MeV 光子は、図 10 に示すように、1,000 GHz 程度の外部光源が必要となる。このような低い方の数 MeV 光子を得ることは、入射光子源の開発が必要なこと、及びビームダクトへの導入に検討が必要なことなどから、超伝導電磁石による高エネルギー放射光が有利であるように思える。

- * 逆コンプトン散乱による γ 線を利用し、核内構造の研究が SPring-8 で行われている(LEP)。しかし、通常の放射光利用者が主である為、蓄積電子ビームの損失が目立って大きくならないように留意する必要がある。本計画では、ビーム損失は追加入射（Top Up Operation）を行うことで蓄積電子ビーム量を確保することを前提にすることにより、実験に使用できる γ 線量を大幅に増やすことが可能となる。
- * GeV γ 線を得る場合の入射光子エネルギーと逆コンプトン光子エネルギーの関係を図 11 に示す。この図で明らかのように、蓄積電子エネルギーに匹敵する逆コンプトン光子エネルギーを求めるためには、比較的光子エネルギーの低いアンデュレータ光に相当する入射光子が必要である。もちろん、図 12 に示すように、分布のエッジに立つピーク幅は入射光子エネルギーが高いほどシャープになるが、強度及びタギングによるエネルギー補正により、エネルギーの低い入射光子で強度を稼ぐことで、分布の幅は広いが強度が稼ぐ方向もある。

4. 中性子生成

1) Giant Resonance による Photoneutron 生成

ここでは、Giant Resonance 反応による Photoneutron 発生を考えており、レーザ波長 10.6 μm の場合が対象となる。113 MeV は Giant Resonance の最大エネルギーより高いが、ターゲットの厚さを厚くしておくことで減衰し、 ^{181}Ta の場合では、最大エネルギー 25.2 MeV から最小エネルギー 7.5 MeV までを Photoneutron 発生に寄与できる。かように考え、反応の最大エネルギーまでの角度広がりから反応断面積を求めると、0.589 barn が得られる。最大値はトムソン散乱断面積 $\sigma_0 = 0.665$ barn であるので、反応断面積はかなり最大値に近い値となっており、この点での改善は望めない。

ターゲット核を ^{181}Ta に選ぶと、表 3 から、Giant Resonance のガンマ線エネルギーに対する反応断面積は、

$$\sigma(E) = \frac{\sigma_m}{1 + \frac{(E^2 - E_m^2)^2}{E^2 \Gamma^2}} \quad (4-1)$$

(4-1)式により図 13 のように求められる。この反応の Integrated Cross Section of Photoneutron yield は、表 3 からガンマ線を最大エネルギー 25.2 MeV から最小エネルギー 7.5 MeV までターゲット内で消費した時の値として得られ、

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{int}}(\gamma, Sn) &= \sigma_{\text{int}}(\gamma, 1n) + \sigma_{\text{int}}(\gamma, 2n) + \sigma_{\text{int}}(\gamma, 3n) = 2,180 + 790 \times 2 + 13 \times 3 \\ &= 3,799 \text{ MeV} \cdot \text{mb} \end{aligned}$$

である。Photon mass attenuation length λ は、

$$\lambda = \frac{1}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)}$$

μ ; mass attenuation coefficient

ρ ; density

と書ける。^{Ref.2} 1 MeV の値を使うと、 $\lambda \sim 15 \text{ gr/cm}^2$ 、密度は理科年表から、 $\rho = 16.6 \text{ gr/cm}^3$ が得られるので、有効なターゲット厚を 1 attenuation length にとると、

$$I = I_0 e^{-t\rho/\lambda}$$

から、 $t = 0.90 \text{ cm}$ となる。アボガドロ数

$$N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ particles/mol}$$

は、 181 gr となるので、単位平方センチメートルあたりの個数 N_{target} は、

$$\frac{16.6 \text{ gr/cm}^3 \times 0.90 \text{ cm}}{181 \text{ gr}} \times (6.022 \times 10^{23}) = 0.50 \times 10^{23} \text{ particles/cm}^2$$

と求められる。表 3 に、Resonance の断面積と Lorentz Parameters、密度を、比較的軽く、加工性が容易な核種について書き記す。

コンプトン散乱をおこす外部レーザーの光子密度は、長波長域 $10.6 \mu\text{m}$ であることから、真空チャンバーに入射する窓によりほぼ決まり、短波長時のような絞り込みはできなく、ほぼ入射時の径で、電子との反応領域を通過するものと考えられる。入射窓の半径を 6 mm と仮定し、反応領域でもこのままであるとすると、レーザー光子密度 s_ν は、

$$s_\nu = \frac{P_L(\text{W})}{1.602 \times 10^{-19} \times k_1(\text{eV}) \times \pi \cdot 0.6^2 (\text{cm}^2)} \quad (4-2)$$

P_L ; レーザの連続出力パワー

長波長域で特異的に大出力である CO_2 レーザ $10.6 \mu\text{m}$ を考えると、

$$k_1 = 0.116966 (\text{eV})$$

$$s_\nu = 4.8 \times 10^{19} P_L(\text{W})$$

Giant Resonance を励起するためのガンマ線発生断面積は、拡き角 0.2 mrad のコーン内に出射されるガンマ線は全てターゲット照射できる。エネルギーが Giant Resonance のためには高すぎる部分が立体角の中心部にあるが、同様に反応すると仮定する。

電子ビーム中の電子数 N_e は、蓄積電流 $I(\text{A})$ の時に、反応領域を通過する個数を考えることになるため、

$$\begin{aligned} N_e &= \frac{I(\text{A})}{1.602 \times 10^{-19}} \\ &= 0.624 \times 10^{19} I(\text{A}) \end{aligned}$$

ビームサイズのほうが外部レーザーサイズより充分小さいことが期待できるので、ほぼ 100% の電子がコンプトン散乱に寄与できる。

従って、コンプトン散乱により得られるガンマ線数 N_γ は、

$$N_\gamma = N_e \times s_\nu \times \sigma \times \left(\frac{2L}{c} \right) \quad (4-3)$$

$$= 0.624 \times 10^{19} I(\text{A}) \times 4.8 \times 10^{19} P_L(\text{W}) \times \sigma(\text{barn}) \times 10^{-24} (\text{cm}^2) \times \left(\frac{2L}{c} \right)$$

L; 反応領域の長さ 16.7 m

$$= 3.28 \times 10^7 I(\text{A}) \cdot P_L(\text{W}) \cdot \sigma(0\langle\theta_2\rangle)(\text{barn}) \quad \text{photons/sec}$$

Photoneutron の発生量 $N_{\text{photoneutron}}$ は、

$$N_{\text{photoneutron}} = \sigma_{\text{int}}(\gamma, Sn) \cdot N_{\text{target}} \cdot N_\gamma \quad (4-4)$$

$$= \sigma_{\text{int}}(\gamma, Sn)(\text{barn}) \cdot 10^{-24} \times 0.50 \cdot 10^{23} \times 3.34 \cdot 10^7 \times I(\text{A}) \cdot P_L(\text{W}) \cdot \sigma(0\langle\theta_2\rangle)(\text{barn})$$

$$= 1.67 \times 10^6 \sigma_{\text{int}}(\gamma, Sn)(\text{barn}) \cdot I(\text{A}) \cdot P_L(\text{W}) \cdot \sigma(0\langle\theta_2\rangle)(\text{barn})$$

ここで、

$$\sigma_{\text{int}}(\gamma, Sn)(\text{barn}) = 3\text{barn}$$

$$I(\text{A}) = 100\text{mA} = 0.1\text{A}$$

$$P_L(\text{W}) = 100\text{W}$$

$$\sigma(0\langle\theta_2\rangle)(\text{barn}) = 0.6\text{barn}$$

従って、

$$N_{\text{photoneutron}} = 2.9 \times 10^7 \quad (4-5)$$

式(2-2)で、レーザー光を反応領域で絞り込むことにより、レーザー光子密度をあげる。

レーザー光の断面半径は、反応領域中心点で最小半径 ω_0 に絞り込まれ、真空槽に入射される点の半径 ω であるとすると、

$$\omega^2 = \omega_0^2 \left\{ 1 + \left(\frac{l \cdot \lambda_L}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right\} \quad (4-6)$$

ここで、 l [m]は、レーザーの入射点から反応領域中心までの距離を示し、SPring-8では、25 mである。 λ_L はレーザーの波長であり、10.6 μm である。真空槽へレーザーを入射する窓は現実的には、半径30 mm程度が限度であろう。(放射光用スリット、アブソーバの現在設置されているサイズは無視している。これより小さい場合には、レーザー入射用窓のさらに下流に、本装置専用の放射光用スリットあるいはアブソーバ等の設置が必要となる。) (4-6)式から ω と ω_0 を求めることができる。反応領域に亘ってレーザーはガウスビームとして振る舞うので、 ω は2次曲線で表わせ、この間での平均半径 $\langle \omega \rangle$ を求めることができる。

ω (mm)	ω_0 (mm)	$\langle \omega \rangle$ (mm) ; 反応領域 16.7 m 間の平均半径
80	1.05	3.99
70	1.21	3.77
60	1.41	3.59
50	1.69	3.49
40	2.11	3.52
30	2.82	3.83
20	4.32	4.90
13	8.91	9.06

平均半径が最も小さくなる $\omega = 50$ mm、 $\langle \omega \rangle = 3.49$ mmの配置を考えると、式(4-2)で0.6 cm 0.35 cmと置きかえることにより、レーザー光子密度は、2.9倍にあがるので、Photoneutronの発生量(4-5)は、

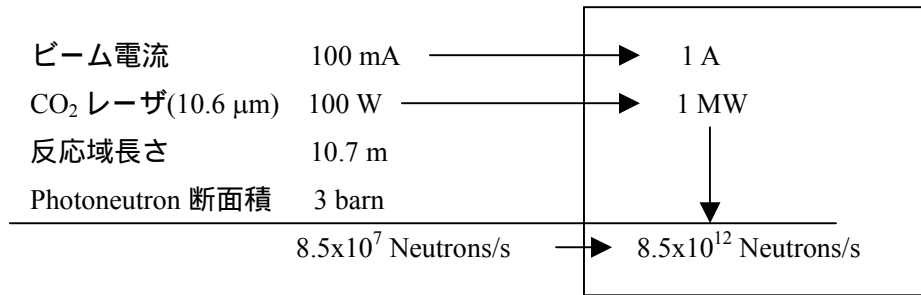
$$N_{\text{photoneutron}} = 8.5 \times 10^7 \text{ particles/s}$$

となる。

レーザー電子光を用いて中性子放出共鳴核反応を利用した中性子生成には、レーザー電子光のエネルギーは数10 MeV(12~13 MeVから25 MeV程度)と比較的低エネルギーである。 P_L (W)を100 Wとしているが、レーザー技術の発展により、CWで1 MWクラスが可能となっている。これにより、 $N_{\text{photoneutron}}$ の個数は、式(4-5)の 10^4 倍が期待できることになり、

$$N_{\text{photoneutron}} = 2.9 \times 10^{11}$$

となる。さらに、HFRの特徴である1 A蓄積電流値とすると、筆者等の評価によれば、



であるから、単バンチビーム(5.98×10^{10} electrons; 蓄積電流換算値 3.87 mA) 当たり期待できる中性子数は、80.7 個、繰返周期 2.48 μs のバースト状となる。1 秒間では 4.15×10^7 個の中性子数となる。Ref.2

覚え書き (参考);

波長 40 μm レーザは、41.7 μm CH₃OH (CO₂ レーザ励起遠赤外レーザ) があるが、出力は mW クラス (?) と低い。10.6 μm CO₂ レーザ (市販品で 100 W クラス CW) を使用し、ターゲットを幾分厚く用いることで可能性が高い。

中性子発生のレーザ電子光を効率良く Head-on Collision で作るためには、シードレーザの波長は極端に長く 40 ~ 50 μm が適当となる。このような長波長レーザは CO₂ レーザ(10.6 μm) を特異な物質にあて 2 次生成として得られるため、10 mW 程度しか強度が得られない。この時のレーザ電子光は、核反応を起こすにたるエネルギーさえ持てば良く、エネルギーが揃っている必要はない。このため、反応領域の真空槽内壁を鏡面仕上げにし、内壁で反射させ、さらに、レーザを複数本使用し、反応領域内を CO₂ (10.6 μm ; 100 W DC) レーザ光で満たす。Ref.3

電子ビームとレーザビームの角度を大きくとり、目的とするレーザ電子光のエネルギーを選択する方法が適当ではないか。

超伝導電磁石による高エネルギー放射光による ⁹Be (γ, n) 反応による可能性も検討すべきである。

ラティス検討

1999/1/21 早乙女

リニアオプティクスの検討途中であるが、経過をまとめておく。

現在考えているラティスの主なパラメータや特徴などは、以下の通りである：

- ・ DBA ラティス (図 14 参照)
- ・ 周長： $L = 594.1856 \text{ m}$ 《 *RF 設置などから、短くても 740 m 必要。図 15 参照》
- ・ エネルギー： 8 GeV
- ・ エミッタンス： 20 nmrad 程度
- ・ harmonic number： $h = 1,008 = 2^4 \times 3^2 \times 7$ ($f_{RF} = 508.58 \text{ MHz}$)
- ・ セル数： 40 (うちノーマルセル 36、直線セル 4)
 - 直線セルは、ノーマルセルから偏向電磁石を除き (missing-B) 四極電磁石を微調整することで作る。
- ・ RF cavity や超伝導ウィグラなどは直線セルの missing-B 部に設置する。直線セルが不足する場合は追加する。Missing-B 部の β_x は DBA ラティスの性格上小さいから、coupled-bunch instability を抑制し、ウィグラによるラティスの乱れを最小限に抑える、といった目的にも合致する。Instability 抑制の観点からは、 β_y も小さくすることが好ましいが、そのためには四極電磁石の追加が必要と思われる。
- ・ SPring-8 蓄積リングにあるような、挿入光源設置専用の直線部は作らない。
- ・ 偏向電磁石は合計 72 台必要で、1 台当たりの曲げ角は、 $\theta_B = 360 [\text{deg}] / 72 = 5 [\text{deg}]$ となる。また、磁場の強さを $B = 0.9 \text{ T}$ 程度とすると、その長さは $LB = (B\rho)\theta_B / B = 2.6 \text{ m}$ となる。
- ・ 電磁石の配置は、まだ最適化していない。(仮に置いてみただけ。) 四極電磁石がやや強いようなので、これを弱くする配置を探す必要がある。現状では、SPring-8 蓄積リングの実績から、四極電磁石の強さの上限を 18 T/m とした。また、このときの配置は図 16 のようになる。
 - $Q1 : 40 \text{ 台}$ 、 $Q2 : 80 \text{ 台}$ 、 $Q3 : 80 \text{ 台}$ 、 $Q4 : 40 \text{ 台}$
- ・ $Q4$ は二つに割って、間にクロマティシティ補正用六極電磁石を挿入する方がよいかもしれない。ただし、クロマティシティ補正はまだ検討していない。ステアリング電磁石の設置スペースも考慮する必要がある。
- ・ ダイナミック・アパーチャが小さい恐れがあるので、ハーモニック六極電磁石の検討も必要と思われる。
- ・ 熱負荷、インピーダンスの検討が重要である。

補足：

- ・ 加速器研究用のオプションとして、”isochronous” または “negative momentum-compaction factor” モードでの運転も可能である。将来、偏向電磁石を通常のものから超伝導電磁石に置き換えるとすると、電磁石の長さは短くなるから、あいたスペースに higher-multipole magnet を追加できる。これにより、例えば高次の項まで

- “isochronous” 性を追求する、ということが可能になるかもしれない。
- TBA ラティスも検討したが、以下の理由で採用しなかった。
 - 超低エミッタンスを追求する必要がない。
 - ラティスの構造が複雑になり、周長が長くなりがちである。
 - アーク部で β_x, β_y を抑えようとする、セル当たりの Q の個数が増える。
 - FODO ラティスは、以下の理由で採用しなかった。
 - エミッタンスを 100 nmrاد 以下にしたい。
 - Cavity 設置場所の β_x, β_y を同時に抑えようとする、リングの対称性がこわれる。

HFR RF Power Estimation

February 17, '99

改訂: Feb.23, '99

HFR 計画を早期に実現する計画案を作成することが急務と考えているので、加速器要素技術開発を必要最小限とし、既存の技術で可能な範囲でデザインを行う。また、入射器は現在稼動しているブースタ・シンクロトロンを使用する関係で、加速周波数も同様の 508.58 MHz, 1.2 MW_{max} クライストロン（東芝製）を前提としている。

問題になる RF 源が、超伝導空洞用に別途開発され、また RF カプラ（現在使用中のものは最大定格 300 kW）も同様に強化、あるいは新規開発などがあれば、当然事情は変わってくる。さらに、HFR ラティス評価は始まったばかりで、RF 部も、標準ラティスの偏向電磁石を除き若干の変更を加える程度にしか検討が進んでいない。特別な RF 部を作らないことから 1 RF ユニットとしては偏向電磁石 1 台分+α程度とする。このような前提のもとに以下、高周波加速系高周波パワーの評価をする。

蓄積電流値が多くなると空洞内での損失（壁電流等）より放射光で失うエネルギー損失が主となる。これらのエネルギー損失分は空洞でエネルギーを補うことになる。この時、超伝導空洞であろうと常伝導空洞であろうと、ビームに与えるために必要なエネルギーは変わらない。ここで、常伝導タイプの例として、現在（というより近い将来、挿入光源が全稼動状態になった時の RF パワー評価）の SPring-8 蓄積リングにおける状況を示す。以下、SPring-8 RF について、「蓄積リング高周波加速空洞関連長期計画案」を参考にした。^{Ref. 4}

偏向電磁石によるビームエネルギー損失	;	9.2 MeV
アンデュレータ 0.1MeV-max x 38 本	;	3.8 MeV
ウィグラ(for positron production)	;	1 MeV

全ビームエネルギー損失 ; 14 MeV

この損失を補うための高周波電圧を 20MV に設定する。現在使用している空洞のシャントインピーダンスは 6MΩなので、リング空洞全体のシャントインピーダンスは、

$$R_{sh} = 6 \text{ M}\Omega \times 32 \text{ 台} = 192 \text{ M}\Omega$$

となる。空洞内での壁損失は、

$$W_{loss} = V_c^2 / R_{sh} = 2.08 \text{ MW}$$

となる。ビームエネルギー損失は 14 MeV なので、クライストロン出力 P_g (MW)と蓄積電流 I (A)との関係は、

$$P_g = (14 \times I) + 2.08 \quad (\text{MW})$$

と表せるから、SPring-8 蓄積リングでは、最大蓄積電流値は 100 mA より、 $P_g = 3.5 \text{ MW}$ となる。RF station はリング全周にわたり 4 箇所設置されているので、1 RF station あたり 0.9 MW となる。この時、空洞は 1 station あたり 8 台使用しているので、空洞 1 台あたりの入力パワーは 113

kW となる。

以上が、現在高周波加速系を評価する時に前提としている根拠である。これと同様な条件で HFR(蓄積電流 1 A)の場合を評価すると、600 m 程度の周長で偏向電磁石によるビームエネルギー損失は、12.3 MeV となる。さらに、超伝導ウィグラの挿入による損失分を約 1 MeV とする。これにより、

全ビームエネルギー損失は、13.3 MeV

と見積もることができる。 $\alpha = 4.4 \times 10^{-4}$ のとき量子寿命 20 時間を得るために必要な over voltage ratio は 1.12 となる。従って、空洞の電圧は

$$13.3 \times 1.12 = 15 \text{ MV}$$

必要となる。空洞の台数を 32 台とすると 1 台でつくる電圧は 0.47 MV となる。空洞のインピーダンスを $5 \text{ M}\Omega$ とすると、壁損失は、

$$W_{\text{loss}} = V_c^2 / R_{\text{sh}} = 44 \text{ kW}$$

となるので、クライストロン出力 P_g (MW) と蓄積電流 I (A) との関係は、

$$P_g = (13.3 \times I) + 1.41 \quad (\text{MW})$$

となる。ここまでの RF 事情は、現在 (近い将来) の SPring-8 蓄積リングの RF 事情と大差ないように見えるが、問題は、蓄積電流値が、10 倍の 1 A としていることにより、

$$P_g = 14.7 \text{ MW}$$

と見積もれることある。上記前提条件に示したように、1RF ユニットの占めることのできるビーム進行方向の長さは、偏向電磁石 1 台分 + α としているので、2.8 m 程度となる。(配置案 Fig.17 参照) ここに既存の空洞を入れると、4 台が限度となる。この空洞 4 台にクライストロン 1 台でパワーを供給する。ここで、0 A、0.2 A、1 A 電流蓄積時に必要な空洞のパワーをまとめておくと、

$$0 \text{ A}; \quad 1.41 \text{ MW} / 32 \text{ 台} = 44 \text{ kW} / 1 \text{ 台}$$

$$0.2 \text{ A}; \quad 4.07 \text{ MW} / 32 \text{ 台} = 127 \text{ kW} / 1 \text{ 台}$$

$$1.0 \text{ A}; \quad 14.7 \text{ MW} / 32 \text{ 台} = 460 \text{ kW} / 1 \text{ 台}$$

蓄積電流 1 A の場合には、単セル-Bell Shape 空洞 64 台を設置すれば、1 台に投入する電力は 220 kW に抑えられる。ただし、ビームがダンプしたときに、空洞に投入される電力及び空洞入力電力が遮断されたときに空洞から反射される電力についての検討が必要である。また、当然だが、HOM についても検討が必要である。

ここで超伝導空洞を適用した場合を考える。当然、壁電流などによる損失は無視してよい。しかし、ビームエネルギー損失分の 13.3 MW はそのまま残る。それでは、超伝導空洞は同じ条件のスペースに何台設置できるか考えると、1 台で約 3 m 程度のスペースを必要としているので、1 台分しか設置できない。前提条件で述べたように、RF 源に現在使用しているクライストロンをそのまま使用することとすると、クライストロンの定格から 1 MW 程度のパワーしか供給できない。多分、超伝導空洞自身にはもっとパワーを入力することが可能であると考えられるが、クライストロン RF 源の定格で抑さえられることになる。入力カプラは現在の使用例では最大 300 kW とされているが、入力方法、絶縁物位置などの変更により、これでは制約されないも

のと考えている。従って、超伝導空洞を使用した場合には、設置場所、台数が、600 kW / 1,000 kW = 60 %程度に抑えられることになる。もちろん、たくさんの空洞を使用するため、空洞の Q 値が高いことが、ビーム不安定性を避ける、という大きな利点を持つが、超伝導に対する難易性、初期建設期の長期化・コストアップ、安定運転への不確かさ、コミッショニング時操作の非定常運転への即応性・柔軟性の不安などの難点もある。

このような点から設計・建設からビーム運転までを最短で結ぶためには、最初からなにがなんでも 1 A でなくてはならないということはないので、当初は常伝導空洞で 200 mA 施設検査許可を目指す（第 1 ステップ）。放射線発生装置施設検査では検査時の電流値は定格の 20 %程度必要であるといわれているので、40 mA を検査対応電流値として 200 mA 使用検査を通し、同電流値で利用実験およびマシンスタディを実施しながら、一方では超伝導空洞の製作・実用試験を実施し、直線部に追加・増強していき、電流値を増加・蓄積していく。

超伝導空洞は 1 台 1.5 MV 程度の加速電圧が得られるので、HFR 全体で 10 台程度の空洞に必要な加速電圧が得られることになるが、入力カプラ 300 kW を制約条件にとると、

$$14.7 \text{ MW} / 0.3 \text{ MW} = 49 \text{ 台}$$

となり、常伝導空洞 64 台に比べて、台数のメリットは小さい。

以下に、この時の RF 事情を評価する。

空洞は N 台使用する。クライストロンは、N / 4 台使用することになる。

蓄積電流値は 200 mA とする。

ビーム電流を I (A) とすると、クライストロン出力 P_g (MW) は、

$$P_g = (13.3 \times I) + 1.41 \text{ (MW)}$$

となる。第 1 ステップで目標とする電流値 $I = 0.2 \text{ A}$ とすると、

$$I = 0.2 \text{ A}$$

空洞 ; 4 台 \times 8 = 32 台では、1 台当たりの壁損失は 44 kW となり、全体の高周波電力は

$$P_g = 4.07 \text{ (MW)}$$

クライストロンは全部で 8 本使用することになるので、クライストロン 1 台当たりの出力は、508 kW となり、かなり余裕がある。クライストロンが 1 本故障しても、1 本当たり 581 kW となり、余裕のある設計である。

空洞 ; 4 台 \times 7 = 28 台では、1 台当たりの壁損失は 57 kW となり、全体の高周波電力は

$$P_g = 4.27 \text{ (MW)}$$

となり 610 kW / 1 クライストロンであり、クライストロンが 1 本故障しても、1 本当たり 712 kW となり、現実的な設計である。

空洞 ; 4 台 \times 6 = 24 台では、1 台当たりの壁損失は 78 kW となり、全体の高周波電力は

$$P_g = 4.54 \text{ (MW)}$$

となり、757 kW / 1 クライストロンとなり、クライストロンが 1 本故障すると、1 本当たり 908 kW となり厳しい設計となる。

従って、第 1 ステップでは、当初からクライストロン 7~8 本、空洞 28~32 台使用して実施する。

第 1 ステップでは最終的に 200 mA 蓄積を、超伝導空洞を追加・増強しながら、達成し、1 A 対応の施設検査に結び付ける（第 2 ステップ）。

空洞の台数が非常に多くなり、既存の単セル-Bell Shape 型空洞では、不都合がでると考えられる。そこで、KEKB で使用されている ARES 空洞、超伝導空洞を併用し、HFR 高周波加速を行うための評価を行う。

$$I = 0.2 \text{ A}$$

単セル-Bell Shape 型空洞を使用した場合、空洞 1 台当たりの入力パワーを 130 kW として空洞台数 32 台、クライストロンを 8 本使用する設計とした。ARES 空洞は、1 台で約 2 台分のパワーを供給することが必要である。Stored Cavity が大きく、高次モード吸収体があるため、軸方向 1,190 mm と制約が大きく、偏向電磁石 2,600 mm の空間に最大でも 2 台しか入らない。これは単セル空洞 4 台を ARES 空洞 2 台で置き換える格好となり、パワー的にもほぼ同等である。従って、ARES 空洞 2 台をクライストロン 1 台で運転し、1 セル当たり、ARES 空洞 4 台、クライストロン 2 本として、全体で加速セルは 4 セル、ARES 空洞 16 台、クライストロン 8 本となる。

* ARES 空洞は 2 つの空洞からなっており、RF を発生するために壁損失が 2 台分必要となる。このため、2 倍の電力を加えても、1.4 倍の加速電圧が発生する訳ではない。

$$I = 1 \text{ A}$$

第一ステップはビームスタディ及び利用実験を行いながら、順次、電流値を既定値の 200 mA まで増加させる。200 mA 達成をもって、第二ステップの許可を得る。これ以降は、超伝導加速空洞を設置していく。蓄積電流 1 A に必要な RF パワーを供給するために、単セル空洞は 64 台必要であった。このうち、32 台分は第一ステップにおいて ARES 空洞でまかなっており、残り 32 台分を超伝導空洞でまかなう。超伝導空洞の場合、入力パワーの制限は RF 源からきていると聞くので、クライストロンの長期間連続安定運転できる妥当なパワーは 0.8 MW と想定すると、必要なパワーは、

$$220 \text{ kW} \times 32 \text{ 台} = 7.04 \text{ MW}$$

となるので、

$$7.04 \text{ MW} / 0.8 \text{ MW} = 8.8 \text{ 台} \rightarrow 9 \text{ 台}$$

となる（1 本つぶれた場合には、880 kW / cavity となり、短期間の運転は可能と思われる）。クライストロンは 9 台必要となり、超伝導空洞も同じく 9 台となる。超伝導空洞の軸方向長さは約 3m であるので、偏向電磁石 1 台分に設置できるとすると、1 セルに 2 台設置できることになり、超伝導空洞加速セルは 5 セル必要になる。

特に大きな挿入光源を入れない現状の設計（1 MW Wiggler 1 台含む）において加速セルは全部で（4 + 5 =）9 セルとなる。単セル-Bell Shape 空洞を使用した場合には、加速セル数は 8 であったので、1 セル分増加することになるが、HFR 全体から見ると、さほどセル数の増減には結びついていない。ただし、ARES 空洞、超伝導空洞を使用することによるビーム安定性は大幅に改善できることが期待できる。今後、HFR Design は、基本的に ARES 空洞、超伝導空洞の併用を考えていく。^{Ref. 5}

予算計画 (October 7, 1998)

ブースタ・シンクロトロン(Sy)建設時の製作コスト評価をベースにする。

本予算計画においては、HFR 周長は 500 m 程度とし、起動時は常伝導で考える。

最大エネルギーは 8 GeV とするが、定格の余裕度は 10 %程度とする。これは、Sy の持つ余裕度に相当している。しかし、HFR に蓄積後、エネルギー上昇・下降は行わない。

概算を掴むことを目的とするため、原価積算など正規の予算積算ではない。

BT 系の積算のため、Sy 将来予定地であった場所（現在、各種研究棟が建っている）を建設予定地とする。

1 . HFR 建屋

1) 建屋床面積

HFR の建屋は、SPring-8 蓄積リングのような実験ホールを全周にわたって持ち、ビームラインを放射状に配置する構造とは考えない。実験に応じたビームラインを HFR 収納の遮蔽壁から導き、実験ステーションを建設する。従って、Sy 建屋構造に近く、これに必要なに応じたビームラインが遮蔽壁から突き出ている形状であるので、価格ベースとしては、Sy の場合を使う。

Sy 本体収納室（以下、本体室）と電源関係及びユーティリティ関係に必要な建屋コストは、本体室の側壁・天井などを除き、さらに設備などを除き、使用床面積当たり約 38.5 万円/m²である。この推定価格は、精度がよくないので、40 万円/m²とする。

本体室内寸法を、幅 3.5 m、高さ 4 m とすると、

$$3.5 \text{ m} \times 500 \text{ m} + \alpha \text{ (SH-BT \& etc)} \longrightarrow 3,000 \text{ m}^2 + 320 \text{ m}^2 + \alpha$$

$$\downarrow$$

$$3.5 \text{ m} \times 250 \text{ m} = 875 \text{ m}^2 \qquad 4,375 \text{ m}^2$$

直線部直前の偏向部から発生するエネルギーの高い放射光を利用し e⁺を生成するためには、本体室にスペースを準備することが必要である。このため、直線部に沿って、さらに、2 m×40 m×4 箇所 = 320 m²程度面積が増加する。偏向電磁石の数台は、当初コミショニング終了後、超伝導偏向電磁石に置き換える可能性あり。BL 積は保存させる方向で考慮する。この部分の床面積は若干増加する。

$$4,375 \text{ m}^2 + 320 \text{ m}^2 = 4,695 \text{ m}^2 \qquad \mathbf{4,695 \text{ m}^2}$$

RF 加速設備は、空洞 4 本を 1 本のクライストロンで運転し、全 22 本のクライストロンを使用。このため、増強を見越して、建屋準備は 24 本とする。

BT 系本体室にビームダンプ部を設け、Sy 調整時に使用する。このためのビームライン及びダンプ部は、

$$10 \text{ m} \times 5 \text{ m} + 3 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 65 \text{ m}^2 \qquad \mathbf{65 \text{ m}^2}$$

常伝導電磁石電源室は 1 ケ所に集中できる。Sy の場合に比べて、DC 電源であるため

列盤は少なくなるが、四極電磁石、六極電磁石ファミリ数は増加するため、盤数はほぼ同数となると思われる。

常伝導電源室； 500 m² 500 m²

この他に入射用パルス電磁石電源室が必要であり、一部補正電磁石電源も共存させる。

入射用パルス電磁石電源室 60 m² 60 m²

パルス電磁石設置周りに作業エリアとして、本体室に約 90 m² 分増加が必要である。

90 m²

RF 電源にクライストロン 24 本程度準備する必要がある、Sy 的に 2 本を一室に配置することになると、

33 m × 25 m × 24 / 2 = 9,900 m² 9,900 m²

これら RF 電源はラティス構成上必要な直線部を集中して配置することは得策ではないように思えるので、全周にわたり分散する。これらの RF 電源室に付属して、補正電磁石電源、ビームモニタ、真空電源 / モニタ等を設置するスペースを 100 m² ずつ準備する。

100 m² × 12 = 1,200 m² 1,200 m²

大物物品の搬入室は作業性、本体室内幅が狭いことなどから、最低二箇所準備するもの(一箇所は制御室横)とし、雨天時の搬入を可能にするために前置搬入室、遮蔽扉、本体室仮置きスペースなどを入れると、

10 m × 20 m + 3 m × 3 m + 4 m × 5 m × 2 = 458 m² 460 m²

小物の搬入及び人員の立ち入りは大物搬入室に付属して設置することにし、遮蔽扉は無く、迷路状 + 区切り扉にする。

8 m × 8 m × 2 = 128 m² 130 m²

BT 系電源室は、配線ケーブルを長く引き回すことによるトラブルを避けるため、二箇所程度設ける。

5 m × 12 m × 2 = 120 m² 120 m²

HFR 制御室(或いは各機器の制御拠点として考える?)は建設期及びコミッションング時のみならず、日常的にも不可欠である。ただし、中央制御室のように外来見学者のコースになることはないので、さほど立派である必要は無い。Sy 並みの機能を持たせれば充分と考えられ、試験・調整運転時にはこの制御室から Sy 運転も行うことになる。(利用者向け定常運転は、中央制御室から行うことになる)インターロック監視盤、ビームモニタ監視用汎用盤、タイミング制御盤、制御用端末 2~4 台、打合・検討用作業机、電子黒板、コピー機、電話 / ファックス、完成図書 / 作業用図面用書架 10 基程度、小物予備品収納ケース、軽量棚 4 基、椅子 10 脚、折り畳み椅子 10 脚、制御用基板ストックケース 4 基、安全設備監視盤 2 基等を納め、運転を行うスペースとして、

8 m × 15 m = 120 m² 120 m²

付帯設備として、給湯室、トイレ、下駄箱など、

2 m × 3 m + 3 m × 4 m × 2 + 6 m × 5 m = 60 m² 60 m²

ユーティリティ設備関係はよく分からないが、Sy の場合の 25 %増として算出してみると、

排風機室 1,2	$6.5 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 1.25 \times 2 = 100 \text{ m}^2$	100 m²
空調室 1,2	$5 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 1.25 \times 2 = 75 \text{ m}^2$	75 m²
DP タンク室	$6 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 1.25 = 60 \text{ m}^2$	60 m²
廃液タンク室	$8 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 1.25 = 60 \text{ m}^2$	60 m²
熱源室(電気室含む)	$23 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 1.25 = 345 \text{ m}^2$	345 m²

以上まとめると、

Sy 本体室 (BT 系本体のみ含む)	4,695 m ²
BT-Beam Dump 部	65 m ²
常伝導電磁石電源室	500 m ²
入射用パルス電磁石電源室	60 m ²
パルス電磁石設置周り作業エリア	90 m ²
RF 電源室	9,900 m ²
補正電磁石、ビームモニタ、真空電源 / モニタ等設置	1,200 m ²
大物物品の搬入室	460 m ²
小物の搬入及び人員の立入	130 m ²
BT 系電源室	120 m ²
HFR 制御室	120 m ²
給湯室、トイレ、下駄箱など	60 m ²
ユーティリティ設備関係	640 m ²

合計建屋面積 18,040 m²

従って、本体、電源室など； $400 \text{ K} \times 18,040 \text{ m}^2 = 7,216 \text{ M¥}$

7,216 M¥

* 本体室の側壁・天井については手持の資料に欠けるので、調査が必要。あるいは、加速器建屋面積をベースに、別途、調査すること。

HFR 建屋の概念図を図 18 に示す。

2) ユーティリティ設備

受配電設備

Sy は 1 秒間の繰り返し運転を行っているが、設備容量としては、8 GeV 相当時に合わせているため HFR 定格電力量を確認すれば、Sy 受配電設備建設価格を参考に出来る。Sy ではパターン運転を行い、それに伴う電力変動を抑えるため、また、高調波ノイズ抑制のため、フィルタ・TQC などを附加しているが、HFR は

DC 運転を行うため、これらの機器は不要となる。

容量 ;	Sy	20 MVA
	SSBT	1 MVA

560 M¥

560 M¥

(Sy よりかなり容量増加になるので、Sy 建設価格のまま)

冷却設備

Sy 初期設計のままの冷却水量で冷却設備が建設されているので、実際の使用水量は設計値の 60 %程度である。従って、冷却水配管、循環設備、冷却能力など設備関係は Sy 冷却設備建設価格を参考にできる。ただし、HFR は蓄積リングであり、冷却水温度（できれば流量も）の安定化が必要である。これは、制御機能の増設で実現できるので、多少の増額で済ませることができる（と期待する）ので、Sy 冷却設備建設価格のままにする。

容量 ;	Sy	12 kl/min
	SSBT	0.8 kl/min

550 M¥

550 M¥

空調設備・換気設備

建屋建設費に入っている。

放射線監視設備

未検討

2 . 機器

1) HFR ラティス電磁石

電磁石本体は、製作行為に主にコストがかかるため、多少の形状の変更では製作コストにほとんど影響はでない。ただし、磁場強度を数点で測定することは仕様に入れるが、磁場分布測定などは電磁石製作範囲には入れない。ラティス構造を決めていない現時点で台数を見積もることは大変無謀なことであるが、何らかの概算を得ることを目的としているので、無謀を承知で求める。基本的に Sy ラティス（40 セル）をベースに、直線部を多数確保するため、セル数を 48 とした。全体は四角形状になる。ただし、四極電磁石を 6 ファミリ、六極電磁石を 4 ファミリと想定する。磁極ギャップ、ボア径など、大電流・蓄積の点から、あるいは真空槽などの実装面から設計変更が必要であろうが、これらの変更は、積層鋼板の面積増大、コイル線材の増長に寄与するだけで、価格への影響は小さい。むしろ、電源の出力容量増加の寄与が大きいと考えられる。

偏向電磁石

Sy では、東芝 R&D 実績価格では、12,000 K ¥ であったが、量産品の場合、設計費が大幅に削減できることから、量産品としては、11,244 K / 1 台であったので、

$$11,244 \text{ K ¥} \times 64 = 719,622 \text{ K ¥}$$

を積算価格とした。(この価格は、包括的なものであるなので、設計費、架台など、偏向電磁石単体として必要な付帯設備は含まれていると考えている。)

四極電磁石

Sy 建設当時の四極電磁石製作価格は、4,723 K ¥

ラティス構造が決まらなると具体的な台数はでないが、現在 Sy では 2 ファミリ / 40 セルであるものを、6 ファミリ / 48 セルとした。

$$4,723 \text{ K ¥} \times 6 \times 48 = 1,360,224 \text{ K ¥}$$

六極電磁石

Sy 建設当時の四極電磁石製作価格は、2,483 K ¥

ラティス構造が決まらなると具体的な台数はでないが、現在 Sy では 2 ファミリ / 30 セルであるものを、4 ファミリ / 28 セルとした。

$$2,483 \text{ K ¥} \times 4 \times 28 = 278,096 \text{ K ¥}$$

補正電磁石

Sy 建設当時の補正電磁石製作価格は、CH; 1,468 K ¥

CV; 1,581 K ¥

ラティス構造が決まらなると具体的な台数はでないが、セル数の増加分のみ入れた。

$$\text{CH; } 1,468 \text{ K ¥} \times 48 = 70,464 \text{ K ¥}$$

$$\text{CV; } 1,581 \text{ K ¥} \times 48 = 75,888 \text{ K ¥}$$

以上、ラティス及び COD 補正電磁石の製作価格をまとめると、

偏向電磁石	720 M ¥
四極電磁石	1,360 M ¥
六極電磁石	278 M ¥
補正電磁石	70 M ¥
	76 M ¥

2,504 M ¥

2,504 M ¥

2) 電磁石電源

Sy ラティス電磁石電源はパターン出力電源であり、本 HFR 用電源は DC 電源であるため、比較はできない。電磁石コイルを Sy と同等なものを想定しているので、

偏向電磁石電源； 最大定格 1,720 A、常用定格 (8 GeV 対応) 1,455 A

四極電磁石電源； 最大定格 670 A、常用定格 (8 GeV 対応) 450 A

六極電磁石電源； 最大定格 400 A、常用定格 (8 GeV 対応) 150 A

がとれる DC 電源を考える。次に出力電圧を算定するために、電磁石本体、配線ケーブルの抵抗分を求める。

偏向電磁石 本体抵抗分 10.6 mΩ / 1 台 64 台 → 712 mΩ
(余裕分 5%含む)

配線ケーブル長 500 m + 100 m + 5 m × 2 × 64 → 1,240 m

抵抗定格値 45.4 mΩ / km / 2 / 1,000m (400 mm² × 2 条) 0.0227 mΩ

ケーブル抵抗値 28 mΩ

偏向電磁石本体 + 配線ケーブルの合計抵抗値 740 mΩ

定格出力；出力電流(A) 1,720 A

出力電圧(V) 1,274 V

50 M¥ 1 台

50 M¥

(SPring-8 で検討中の QM-PS(570A x 1,150V)が 25M¥であることを基準にしている)

四極電磁石 本体抵抗 12.5 mΩ/1 台 48 台 → 630 mΩ
(余裕分 5%含む)

配線ケーブル長 500 m + 100 m + 5 m × 2 × 48 → 1,080 m

抵抗定格値 72.2 mΩ / km / 2 / 1,000m (325 mm² × 2 条) 0.0361 mΩ

ケーブル抵抗値 39 mΩ

四極電磁石本体 + 配線ケーブルの合計抵抗値 669 mΩ

定格出力；出力電流(A) 670 A

出力電圧(V) 448 V

12 M¥ 6 台

72 M¥

(SPring-8 で検討中の QM-PS(570A x 1,150V)が 25M¥であることを基準にしている)

六極電磁石 本体抵抗 19.4 mΩ/1 台 28 台 → 570 mΩ
(余裕分 5%含む)

配線ケーブル長 500 m + 100 m + 5 m × 2 × 28 → 880 m

抵抗定格値 12.2 mΩ / km / 1,000m (150 mm² × 1 条) 0.122 mΩ

ケーブル抵抗値 107 mΩ

六極電磁石本体 + 配線ケーブルの合計抵抗値 678 mΩ

定格出力；出力電流(A) 400 A

定格出力；出力電流(A) 400 A
出力電圧(V) 271 V

5 M¥ 4 台 20 M¥

(SPring-8 で検討中の QM-PS(570A x 1,150V)が 25M¥であることを基準にしている)

CH 本体抵抗 1 Ω/1 台 1 台 → 1.05 Ω
(余裕分 5%含む)

配線ケーブル長 500 m / (8 × 2) + 100 m → 131 m
抵抗定格値 1.31Ω / km / 1,000m (14 mm² × 1 条) 1.310 mΩ
ケーブル抵抗値 172 mΩ
CH 電磁石本体 + 配線ケーブルの合計抵抗値 1.22 Ω

定格出力；出力電流(A) 10 A
出力電圧(V) 12 V

GP016-20R ; 160,000 ¥ 48 台 7.68 M¥

CV 本体抵抗 1.6 Ω/1 台 1 台 → 1.68 Ω
(余裕分 5%含む)

配線ケーブル長 500 m / (8 × 2) + 100 m → 131 m
抵抗定格値 1.31Ω / km / 1,000m (14 mm² × 1 条) 1.310 mΩ
ケーブル抵抗値 172 mΩ
CV 電磁石本体 + 配線ケーブルの合計抵抗値 1.85 Ω

定格出力；出力電流(A) 10 A
出力電圧(V) 19 V

GP035-15R ; 165,000 ¥ 48 台 7.92 M¥

偏向電磁石電源 300 M¥? 1 台 300 M¥
四極電磁石電源 80 M¥? 6 台 480 M¥
六極電磁石電源 50 M¥? 4 台 200 M¥
CH-PS 0.160 M¥ 48 台 8 M¥
CV-PS 0.165 M¥ 48 台 8 M¥
磁石配電ケーブル + 工事 100 M¥? 1 式 100 M¥

1,096 M¥ ?

合計金額 (諸経費 20% 含む) 1,316 M¥

1,316 M¥

3) ビームモニタ

運転当初に必要な機種のみ入れる。

BPM; 6sets x 48cells = 288 sets 1,136 M ¥

処理回路は Sy 使用の回路であり、1 タン測定機能は含まれていないため、考慮が必要。このための費用約 20%としておく。 1,363 M ¥

DCCT; 2 sets 24.8 M ¥ 50 M ¥

fast-CT; 2 sets 25 M ¥

RF-KO; 4 Stripline type 48 M ¥

Pickup

Tune

RF-KO

RF Amp + L.L. High Power 50 M ¥

Low Power 20 M ¥

SR; (FE, shutter etc 不含。初期に観測するための機器のみ) 20 M ¥

ビームモニタ用タイミング回路 80 M ¥

処理回路機器絶縁電源、収納ラックなど 100 M ¥

1,756 M ¥

合計金額 (諸経費(30%)含む) 2,282 M ¥ ?

2,282 M ¥

4) 真空系

蓄積電流値の増大、偏向電磁石磁場増大、大電流化に伴う真空槽内壁形状の適正化などの理由から、真空槽の廃熱能力の増強、内壁形状の検討などが必須であり、これは本 HFR 建設計画で、かなり重要なテーマである。これら問題は具体的検討を実施しないと概算の算定が出来ないが、SPring-8 リングの場合、真空槽全周では 100 億円であったらしい。真空槽は周長に比例すると考えることができるため、

$$10,000 \text{ M ¥} \times 480 \text{ m} / 1,400 \text{ m} = 3,430 \text{ M ¥}$$

としておく。同時に真空槽に内蔵する分布型真空排気ポンプの検討が不可欠である。

粗排気装置は従来のターボ分子ポンプ(TMP)を主ポンプとする真空排気装置を考えるが、真空槽を超高真空に保たなければならないことから、TMP は当然磁気浮上型、排出ポンプは従来の油回転ポンプではなく、ドライポンプを使用する。このような粗排気装置は移動可能式として組み上げるが、真空系立上作業、追加作業、さらに電流増加試験時の補助的真空排気装置として、全必要台数の少なくとも半数は準備するものとする。

真空槽立上時のベーキングは現在使用している方法を採用し、熱源は利用できるものとする。

ビームダクト

ビームダクトは Sy 部では参考にならない。

レーザ電子光装置用に偏向電磁石部真空ダクトを交換した時、1億5千万円であった。この費用内訳を見ていないのでどこまで入っているか定かではないが、現在使用している真空槽より価格減になることは想像できないので、このままの価格が偏向電磁石部真空槽一基分の価格としておく。この中には、組み込み型真空ポンプ、同電源、ベーキングヒータ(?)等(外部熱源は除く)、封止フランジあるいは封止バルブ(ビーム軌道に設置するゲートバルブは除く)、クロッチアブソーバ(廃熱熱源は除く)、一次SR取り出しポートなどは含まれている。

直線部は、特殊な部分を除けば、放射光の熱負荷はさほどないが、偏向部真空槽との接続部、電磁石との組み付け等を有する。BPM、ストリップライン型モニタあるいはRF-KO、RF加速区間、入射用パルス電磁石区間などの特殊な部分を除く。

真空作業、真空事故対策のため、リング全体を長直線部と円弧部とに区切ることができるよう、ゲートバルブを8台設置する。この他の入射部、RF部などにゲートバルブの設置が必要な場合には、各々の区分で考慮する。

偏向電磁石部真空槽			3,430 M ¥
直線部真空槽	20 M ¥	56 台	1,120 M ¥
ゲートバルブ	5 M ¥	8 台	40 M ¥
真空槽合計			4,590 M ¥

4,590 M ¥

真空排気系

真空排気系は Sy 部では参考にならない。

粗排気装置は、TMP300l/s クラスを主機とする排気装置セットで約350万円程度であるが、排出ポンプを油回転ポンプからドライポンプに交換するため、約80万円程度価格が上がる。粗排気装置は、定価で約430万円とする。真空槽のコンダクタンスはどう考えても良いようには見えないので、(偏向部+直線部)一個所に1セット配置する。従って、真空計もこの程度設置する。真空計は、比較的丈夫であり、低真空域検出器と自動切換の機能を持つコールドカソードゲージ型と超高真空域で真空度を測定することを目的としたヌードイオンゲージ(ダブルフィラメント)型を併設する。

直線部	粗排気装置	4.2 M ¥	56 式	235 M ¥
RF 部	粗排気装置	4.2 M ¥	6 式	25 M ¥

入射部 粗排気装置	4.2 M ¥	4 式	17 M ¥
長直線部 粗排気装置	4.2 M ¥	12 式	50 M ¥
(電源等、含む)			78 式 328 M ¥
直線部 IP (50 l/s)	0.5 M ¥	56 台	28 M ¥
RF 部 IP(400l/s)	1.5 M ¥	6 台	9 M ¥
入射部 IP(400l/s)	1.5 M ¥	4 台	6 M ¥
長直線部 IP(400l/s)	1.5 M ¥	12 台	18 M ¥
(電源等、含む)			61 M ¥
CCG 真空計	0.5 M ¥	78 式	39 M ¥
NIG 真空計	0.6 M ¥	78 式	47 M ¥
(電源等、含む)			86 M ¥
真空排気関連市販品合計			474 M ¥

これら真空関連の市販品は、これだけの台数をまとめて発注する場合、定価の 60%程度から入札競争が始まることが常識的であり、ここでは約 50%としておく。

真空排気関連市販購入価格合計 237 M ¥

237 M ¥

5) RF 加速設備

当面、従来の RF 加速設備を主体とし、クライストロン 8 本から開始する。価格算定は、現在実施している Ring RF_A Station の建設価格をベースにする。従来型をベースにすると、1ステーション分の内訳は、

Cavity(Tuner,冷却 ; 含む)		8 台	270 M ¥
RF Coupler	3 M ¥	10 台	30 M ¥
クライストロン電源	120 M ¥	1	120 M ¥
冷却システム	50 M ¥	2	100 M ¥
高周波伝送系	150 M ¥	1	150 M ¥
サーキュレータ	30 M ¥	2	60 M ¥
温調系	50 M ¥	2	100 M ¥
クライストロン	56.2 M ¥	2	112.4 M ¥
クライストロンベース	15.3 M ¥	2	30.6 M ¥
Low Level	100 M ¥	2	200 M ¥
据付、管理費等	100 M ¥	2	200 M ¥

1,373 M ¥

高周波加速設備 4 ステーション分 建設価格 5,492 M ¥

5,492 M ¥

6) 入射系

入射スキームの検討は済んでいないが、Sy 出射スキームのほぼ逆向きであると考え

ると、
4 バンプ電磁石、4 パルスセプタム電磁石
の組み合わせで Off-axis 入射が可能である。

製作機器の BL 積など磁場測定機器及び測定の一部は入っている。

バンプ電磁石		4 台	23 M ¥
バンプ電磁石電源		4 台	106 M ¥
セプタム電磁石 1	20 M ¥		20 M ¥
セプタム電磁石 1 電源	19 M ¥		19 M ¥
セプタム電磁石 2	19 M ¥		19 M ¥
セプタム電磁石 2 電源	19 M ¥		19 M ¥
セプタム電磁石 3	21 M ¥		21 M ¥
セプタム電磁石 3 電源	27 M ¥		27 M ¥
セプタム電磁石 4	22 M ¥		22 M ¥

セプタム電磁石 4 電源	33 M ¥	33 M ¥
--------------	--------	--------

入射用パルス電磁石系合計		309 M ¥
--------------	--	---------

309 M ¥

7) BT 系

BT 系建設費用を大きくしたくないため、本来 Sy 将来予定地、現在箱物建設ラッシュ予定地となっている敷地に建設することを考える。

BT 系はほぼ引き回す距離に比例すると考えられるが、Sy 建設時には、かなり厳しい減額を行ったため、ほぼ同程度の価格が適正な価格であるように思う。ただし、ビームダンプ撤去作業及び BT 系途中一個所に Sy 調整時に使用するビームダンプ建設（あるいは移設・設置）も含む。

BT 系電磁石及び電源、ビームモニタ、真空槽、真空機器など一式

1,000 M ¥

8) タイミング制御設備

入射パルス電源のトリガ、電子銃パルストリガ、バンチ ID 用タイミング、ビームモニタ用トリガなどを制御するため、基本周波数をベースにしたタイミング制御装置を構築する。基本的には、現在行っている単バンチ作成用に使用している同種機器を使用する。位相安定化光ファイバケーブル（12 芯程度）を全周に亘り張り巡らせることにより、RF ステーション間の位相同期も行う。基本周波数発生器および位相安定化光回路を含む。

位相安定化光ケーブル 一式（配線工事、端末処理など含む） 30 M ¥

タイミング用機器 一式（E/O, O/E 等、含む） 150 M ¥

180 M ¥

合計（諸経費 20%含む） 216 M ¥

216 M ¥

9) 計算機制御設備

HFR 制御室からコミショニング、点検時および長期停止後の起動・調整、ビーム研究時の運転を行う。このため、適当な EWS 及び端末等を必要とする。Sy の EWS 本体更新に約 5 千万円要しており、本体価格はこの程度見ておけば充分である。この他に端末が必要であるが、100 万円程度の端末を 4 台と補助的にパソコン 4 台を考える。

直接は計算機制御ではないが、ITV 利用のモニタ設備も本項に含める。これに要する費用は、必要な光ケーブルの敷設、切換器などを含めて、2 千万円程度か。

各機器制御用 VME に要する費用は、現在、SPring-8 で使用しているボードで全て賄えることを仮定すると、ドライバ・ソフトの開発が不要になり、EM、GUI などの制御ソフトウェアが全て内策できることになる。このため、VME モジュールのみ購入することで対応がつく。ちなみに、CPU モジュールが 120 万円、典型的な DIO モジュールは 30 万円であるので、一個所に置く VME 1 台あたり 500 万円 (UPI 含む) 程度である。設置台数は、

電磁石電源室	2 台		2
RF	1 台	× 4 室 (当初)	4
モニタなど	2 台	× 4 室 (当初)	8
入射パルス	1 台		1
制御室、テスト	2 台		2
I/L 監視	1 台	× 4 室 (当初)	4
			20 台
制御用 EWS 本体(OS など含む) 一式			50 M ¥
端末	1 M ¥	4 台	4 M ¥
補助 PC	0.5 M ¥	4 台	2 M ¥
Appli. Soft.	2 M ¥	1 式	2 M ¥
VME	5 M ¥	20 台	100 M ¥
ITV モニタ設備	20 M ¥	1 式	20 M ¥
			178 M ¥
合計 (諸経費 20%含む)			214 M ¥

214 M ¥

10) 加速器機器現地据え付け工事

電磁石等の精密据え付け費用は含まないものとして算定する。SPring-8 側から適当な現場指示及び相当な助成を前提とする。

ケーブル配線等を含む。(電磁石 - 電源間、空洞 - 電源間導波管の接続は除く。位相安定化光ファイバ、制御 LAN 光ファイバ、汎用光ファイバの敷設・端末処理は除く。)

現地据え付け・共通費 一式

1,317 M ¥

HFR Budget

1. HFR 建屋

1) 建屋面積	7,216 M ¥ (遮蔽体・側壁&天井含まず)
2) ユーティリティ設備	
受配電設備	560 M ¥
冷却設備	550 M ¥

2. 機器

1) HFR ラティス電磁石	2,504 M ¥ (常伝導電磁石のみ)
2) 電磁石電源	1,316 M ¥ ?
3) ビームモニタ	2,282 M ¥
4) 真空系	4,590 M ¥
	237 M ¥
5) RF 加速設備 (4 ステーション分)	5,492 M ¥
6) 入射系	309 M ¥
7) BT 系	1,000 M ¥
8) タイミング制御設備	216 M ¥
9) 計算機制御設備	214 M ¥
10) 加速器機器現地据付工事	1,317 M ¥

HFR 第 1 期建設予算額 27,803 M ¥

第一期建設期の大工程表を図 19 に示す。第一期建設 (蓄積電流 200 mA) では、超伝導空洞、超伝導電磁石を使用しないので、最短で 5~6 ケ年の建設期間で、ビーム初期調整が開始できる。この間に、建設と並行して、超伝導技術の確立と実機試験を実施し、第一期終了直後から、順次、超伝導空洞・電磁石を製作し、第一期建設によるビーム利用を実施しながら、例えば、定期点検を実施する夏期長期停止期間時に追加していく。超伝導空洞の製作に期間を要するので、第二期完成までに 3~5 ケ年、さらに必要であると思われる。

HFR 問題点

SPring-8 HFR を実施する上で、要素開発、検討を行わなければならない点を以下に列挙する。項目によっては、考え付くままに書き出すところが多分にあり、問題点の整理自体に検討を加えなくてはならないものもあることをお断りしておく。

1) 高周波加速空洞

蓄積電流が大きいこと、リング周長を比較的短く設計しているため放射エネルギー損失が大きいこと、放射エネルギー損失の大きい挿入光源を使用すること、...などの事情から、高周波加速電力は膨大なものとなる。直接、蓄積ビームに加速エネルギーを与える高周波空洞の台数も増加することから、常伝導空洞では高周波寄生振動数を避けるような調整が困難になり、Coupled-Bunch instability 抑制の点から現実的な選択ではなくなる。この問題を解消するためには空洞の共鳴幅が極端に狭くできることから、寄生振動数を避けた運転を行うことが可能となる超伝導空洞を選択する。第一期運転当初の低電流運転*では、ARES 型常伝導空洞で運転を開始し、コミッショニングを実施するほうが現実的である。本 SPring-8 加速器部門には、空洞に限らず超伝導技術の蓄積は乏しいため、早期に、検討・試作等を開始しなくてはならない。

超伝導加速空洞の検討・製作・試験運転

超伝導用液化装置 + テストスタンド建設

*低電流運転；200 mA 蓄積を目標とする。この電流値は、最終目標電流値 1 A の 20 % に相当し、200 mA 蓄積が成功した時点で、第 2 期コミッショニングを開始する。

2) 超伝導偏向電磁石

陽電子発生用にウィグラ型ではなく偏向電磁石 1 台を初期立ち上げ後、超伝導偏向電磁石に入れ替える。超伝導偏向電磁石の試作・磁場測定など。発生する放射光の高エネルギー一部は数 MeV に達し、実験に使用する一部を除き、吸収し遮蔽・排熱を行わなくてはならない。このため、真空槽を専用に考えなくてはならない。

3) 大電流蓄積に伴うビーム不安定性の検討

抑制に使用するためのフィードバック機器

4) 真空槽の材質・内部形状・真空排気方式

大電流化に伴い放射光の不使用部分を吸収し遮蔽するため光吸収体を開発しなくてはならない。これに伴う熱除去問題の解決も必要である。

大電流に伴うビームダクトの RF コンタクト

5) 陽電子発生評価

超伝導偏向電磁石 - ターゲットアセンブリ

6) Lattice Optimization

文中にも記したように、最適化には程遠い。周長・エミッタンスを実験条件と合わせて最低化しなくてはならないが、今後、RF の設計とも連携を取りながら、検討を進める。

7) Beam monitor

大電流蓄積のため、ビーム軌道が確保できなければ、真空ダクトの破損にも繋がる。また、緊急時の監視を行いビーム停止を安全に行なえる信頼性の高いモニタリング手段を検討しなくてはならない。

8) BT Lattice

ビーム輸送系の検討には着手していない。これは、設置場所の決定に強く影響を受けるため、最後になっている。リングを効果的に運転するため、単にビームを通過させるためのラインとしない検討が有効である。

最大の問題は、この計画で実現できる多方面の基礎から応用分野のササイエティを立ち上げることである。

Acknowledgements;

Photoneutron 生成データの情報は浅野氏から得た。さらに、超伝導電磁石による放射光を用いた ${}^9\text{Be}(\gamma, n)$ による中性子生成の可能性についての提案も受けた。

References;

1. Private communication in Japanese (早乙女 光一、“超伝導 wiggler による slow positron 生成効率の評価”, 1994).
このなかで、photon flux $F(\omega)$ の評価は、
S.Krinsky, M.L.Perlman and R.E.Watson, in “Handbook of Synchrotron Radiation”, Vol.1, p.65; Eq.(11),
陽電子生成量のシミュレーションは、
W.R.Nelson, H.Hirayama and D.W.O.Rogets, “The EGS4 Code System”, SLAC-265, 1985,
 β^+ 崩壊性同位元素からの β^+ から slow positron への変換効率については、
広瀬雅文、“PF 低速陽電子源研究会報告”, KEK Proceedings 93-21, p.20,
Modified Bessel 関数積分形の近似式は、
V.O.Kostroun, “SIMPLE NUMERICAL EVALUATION OF MODIFIED BESSEL FUNCTIONS $K_\nu(x)$ OF FRACTIONAL ORDER AND THE INTEGRAL $\int_0^x k_\nu(\eta)d\eta$,
を各々参照している。
2. Private communication in Japanese (米原、伊達、早乙女、“電子蓄積リングによる中性子源”, July 15,1998).
この中で、MeV Photon 生成量の評価に、
現在 SPring-8 と大阪大学の共同研究として、SPring-8 蓄積リングにレーザ電子光装置を設置するための計画書 (“Quark Nuclear Physics with Multi-GeV Polarized Photons at SPring-8”, RCNP, Osaka Univ. 1997, February)
Photoneutron の断面積は、
S.S.Dietrich and B.L.Berman, “ATLAS OF PHOTONEUTRON CROSS SECTIONS OBTAINED WITH MONOENERGETIC PHOTONS”, ATOMIC DATA AND NUCLEAR DATA TABLES **38**, 199-338(1988),
Photon Attenuation Length は、
BOOKLET of PARTICLE PHYSICS, July 1996
ターゲット候補の原子量、密度は、理科年表を参考にした。
3. 伊達、Private communication in Japanese (“10 MeV γ production by CO_2 Laser 検討()”, November 08, 1998).
4. 川島、Private communication in Japanese (“蓄積リング高周波加速空洞関連長期計画案”, 1997).
5. E.Ezura et al; “RF SYSTEM FOR KEK B-FACTORY”, KEK Preprint 98-93, July 1998 A.

SCWによるslow positron生成効率の評価

formulated by K. Soutome

assume; (slow positron) / (positron produced in Tungsten slab) = $\kappa_{\text{slow}} = 10^{-4}$ (Constant)

Thickness of Tungsten slab [cm]	Electron Energy [GeV]					
	8	10	12	14	16	18
0.5	6.46E+09	3.92E+10	1.22E+11	2.60E+11	4.37E+11	6.31E+11
1	1.07E+10	6.59E+10	2.06E+11	4.41E+11	7.44E+11	1.08E+12
3	1.75E+10	1.11E+11	3.53E+11	7.62E+11	1.29E+12	1.88E+12
5	1.89E+10	1.21E+11	3.87E+11	8.39E+11	1.43E+12	2.08E+12
10	1.92E+10	1.23E+11	3.96E+11	8.61E+11	1.47E+12	2.14E+12

Table 1; Estimation of Slow-Positron Production Yield with 8-T Super-Conducting Magnet.

MeV領域のレーザー電子光発生に使用できるレーザーの種類			
レーザー種類	発振波長 (μm)	励起源	特徴など
Nd ³⁺ : Y ₃ Al ₅ O ₁₂ , (YAG)	1.06414 (R2 >> Y3 , 最強)	FL, AL, L	高効率、大出力、多波長発振
Co ²⁺ : MgF ₂	1.63 - <u>2.50</u>	L	波長可変、広帯域、長波長
CO ₂	10.6	L	10 W ~ 200 W CW
NH ₃	(CO ₂ レーザー励起 遠赤外レーザー)		mW ?
CF ₄			
CH ₃ OH			
		FL ; フラッシュランプ	
		AL ; アークランプ	
		L ; レーザ	

Table 2; Available Lasers produced MeV Laser-Electron Photon.

Integrated Cross Sections and Lorentz Parameters from Photoneutron Cross-Section Data
 from "Atomic Data and Nuclear Data Tables **38**, 199-338(1988)"

from 理科年表

Nucleus	$E_{\gamma \text{ Max}}$ (MeV)	$E_{\gamma \text{ thres}}(1n)$ (MeV)	Integrated Cross Section				Lorentz Parameters						原子量	密度 (gr/cm ³)
			$\sigma_{\text{int}}(\gamma, 1n)$ (MeV-mb)	$\sigma_{\text{int}}(\gamma, 2n)$ (MeV-mb)	$\sigma_{\text{int}}(\gamma, 3n)$ (MeV-mb)	$\sigma_{\text{int}}^{\text{tot}}(\gamma, Sn)$ (MeV-mb)	E_{m1} (MeV)	σ_{m1} (mb)	Γ_1 (MeV)	E_{m2} (MeV)	σ_{m2} (mb)	Γ_2 (MeV)		
Mo													95.94	10.2
⁹⁴ Mo	28.4	9.5	1039	313		1665	16.36	185	5.50					
⁹⁶ Mo	27.8	9	1045	438		1921	16.20	185	6.01					
⁹⁸ Mo	26.8	8	940	574	4	2100	15.80	189	5.94					
¹⁰⁰ Mo	27.0	8	811	692	25	2270	15.74	171	7.81					
^{Nat} Ag	24.9	9	1364	279		1922	16.07	199	7.38				107.8682	10.5
¹⁸¹ Ta	25.2	7.5	2180	790	13	3799	12.30	259	2.43	15.23	341	4.48	180.9479	16.6
^{Nat} W	21.3	6	1860	994	0	3848	12.56	268	2.66	15.17	328	4.69	183.84	19.1
¹⁹⁷ Au	21.7	8	2588	479		3546	13.72	541	4.61				196.96654	19.3
^{Nat} Pb	16.9	6.5	2902	145		3192	13.48	602	4.20				207.2	11.34

Table 3; Photoneutron Cross Sections and Lorentz Parameters of Giant Resonance.

Figure Captions;

Fig. 1 ; 8 GeV 電子リングに超伝導電磁石 (8 T) を設置した時に放射光として得られる光子数

横軸は光子エネルギー (MeV) を、縦軸は光子数を示す。世界 3 大放射光施設の一つである SPring-8 リング偏向電磁石から得られる放射光の Critical Energy が 34 keV であることを考えれば、いかにエネルギーの高い光子分布が得られるか、明白である。図中、縦の破線は、電子-陽電子対生成に必要なエネルギー閾値を示す。

Fig. 2 ; 光子 - 陽電子変換効率

光子をターゲットに照射し陽電子を生成する場合、変換効率は光子エネルギーとターゲット厚さにより求められる。本図は、ターゲットにタングステンを選び厚さを変えた場合に、入射光子エネルギーによる変換効率のシミュレーションである。光子エネルギーに応じてターゲット厚を増加することによる変換効率の向上には実用限度があり、薄めのターゲットを複数枚使用することが実質的な向上に繋がる。

Fig. 3 ; 被積分関数 $\kappa(\omega)F(\omega) / (0.1\omega / 100)$

タングステンをターゲットにし、各々の厚さに対する入射光子エネルギーによる被積分関数の変化を示す。

Fig. 4 ; 常伝導偏向電磁石と超伝導偏向電磁石によるビーム軌道

HFR 初期ビーム調整は常伝導電磁石で行い、ビーム調整の後、適当な時期に高エネルギー放射光を取り出すために、超伝導偏向電磁石に置き換える。置き換えは全数行なうのではなく、実験ステーションに合わせて個々の偏向電磁石で実施する。

Fig. 5 ; 超伝導電磁石による高エネルギー放射光発生方向

放射光と電磁石との干渉を見るため、ビーム軌道をラティス中心軸に直線とした。従って、偏向電磁石内で放射光の方が曲がっている。Q4 電磁石の外側ヨークから下流のヨーク部に放射光が当たりそうであり、Q4 が放射光シールド、ビームラインなどの開始点となりそうである。直下流の偏向電磁石の真空槽は十分な対策をとる必要がある。

Fig. 6 ; 電子と入射光子の正面衝突による出射光子 (レーザー電子光) の角度とエネルギーの関係

入射光子は CO₂ レーザを想定し、レーザー波長は、10.6 μm (光子エネルギーは 0.117 eV) 電子エネルギーは 8 GeV である。

Fig. 7 ; 電子と入射光子の正面衝突による出射光子 (レーザー電子光) の角度とエネルギーの関係

入射光子として波長 200 nm (光子エネルギーは 6.20 eV) 電子エネルギーは 8 GeV である。

Fig. 8 ; 電子と入射光子の正面衝突による出射光子 (レーザー電子光) の角度と断面積の関係

Fig. 6 と同条件であり、最前方のコーンの断面積を求めた。

Fig. 9 ; 電子と入射光子の正面衝突による出射光子（レーザー電子光）の角度とエネルギーの関係

Fig. 7 と同条件であり、最前方のコーンの断面積を求めた。

Fig. 10 ; 入射光子エネルギーとレーザー電子光エネルギーの関係

横軸は、入射光子の波長（nm）で記している。1240 を入射光子の波長（nm）で割ると、光子エネルギーを eV の単位で求めることができる。

Fig. 11 ; 高エネルギーのレーザー電子光

入射光子として、keV 程度の光子を用いれば、電子エネルギーに匹敵するレーザー電子光を得ることができる。加速器周辺では、例えば、アンデュレータ光は準単色光であり、光子数も多いことから、入射光子として使用できる可能性がある。

Fig. 12 ; Energy differential cross section for producing gamma quanta in Compton-back-scattering process on an 8 GeV electron beam of X rays at energies E_x indicated in the figure. Also indicated are energies of gamma rays above which cross section integrated reach certain portions of total cross sections.

Fig. 13 ; Giant Resonance の中性子放出断面積

¹⁸¹Ta による Giant Resonance の中性子放出断面積の光子エネルギー依存性を示す。

Fig. 14 ; ラティス評価

上は、HFR ノーマル部のベータ、分散関数を示す。下は、オプションとして α を negative にしたラティスのベータ、分散関数を示す。（これらは、評価途中であり、最適化されていない。）

Fig. 15 ; HFR 外形

周長を、742.732 m（ハーモニック数 1,260）とした外形図。

Fig. 16 ; ラティス構造

1 セル分のラティスを組む偏向電磁石及び四極電磁石の配列である。さらに、六極電磁石を 4 台程度と複数台の補正電磁石を追加する。

Fig. 17 ; 空洞配置案

偏向電磁石を抜いたミッシングバンド部に空洞を 4 台設置する。

Fig. 18 ; 建屋配置案

加速器本体遮蔽体の周囲に各種電源、付帯設備を収納する。これらの配置は、加速器要素の今後の検討に従って、変更される。

Fig. 19 ; HFR 第一期建設計画

予算化されてからの建設期間は、最短で 4~5 年程度必要である。これ以前に、概念設計を行い、本計画の隘路となるテーマについては試作器などを使った検討が実施されているものとした。第二期に

に向けた超伝導電磁石、超伝導加速空洞は第一期建設と同時に、別途、試作機製作・製作を行い、技術的に確立しなくてはならない。

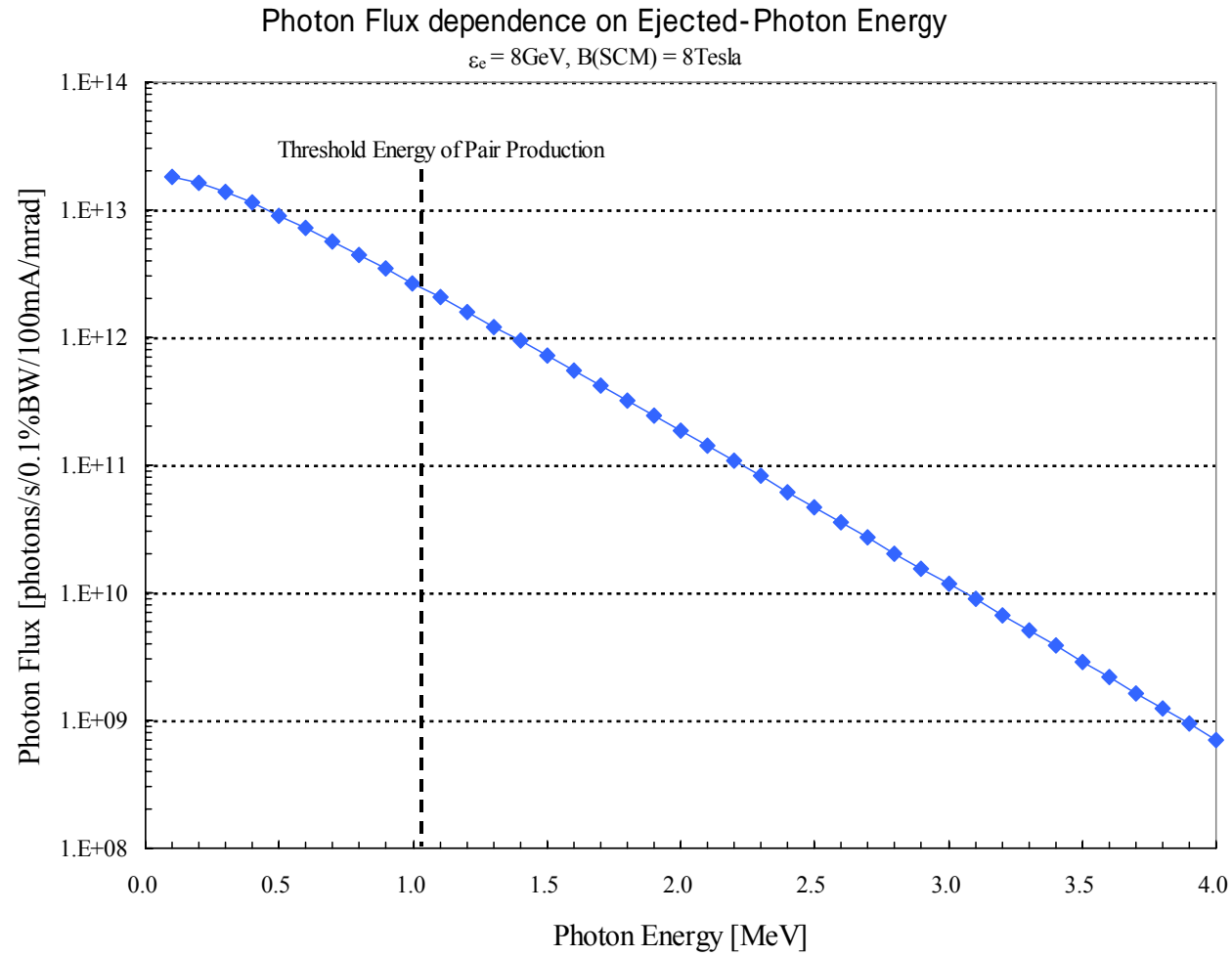


Fig. 1; Expected Photon Flux due to 8 Tesla Magnet with SPring-8 Storage Ring

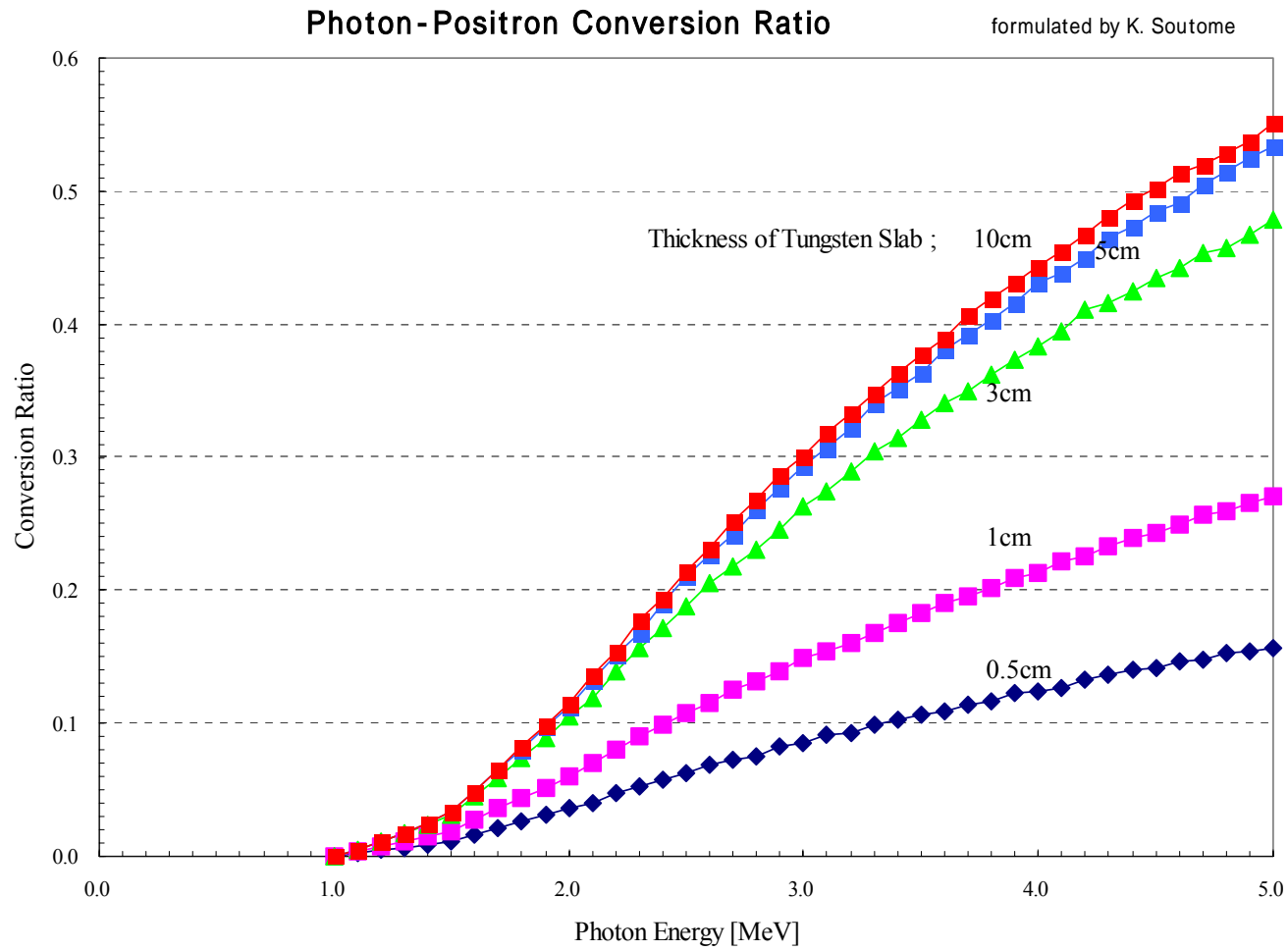


Fig. 2 ; Conversion Ratio of Photon to Positron with Tungsten Slab

Integrand

$\epsilon_e=8\text{GeV}$, $B(\text{SCW})=8\text{T}$

by K. Soutome

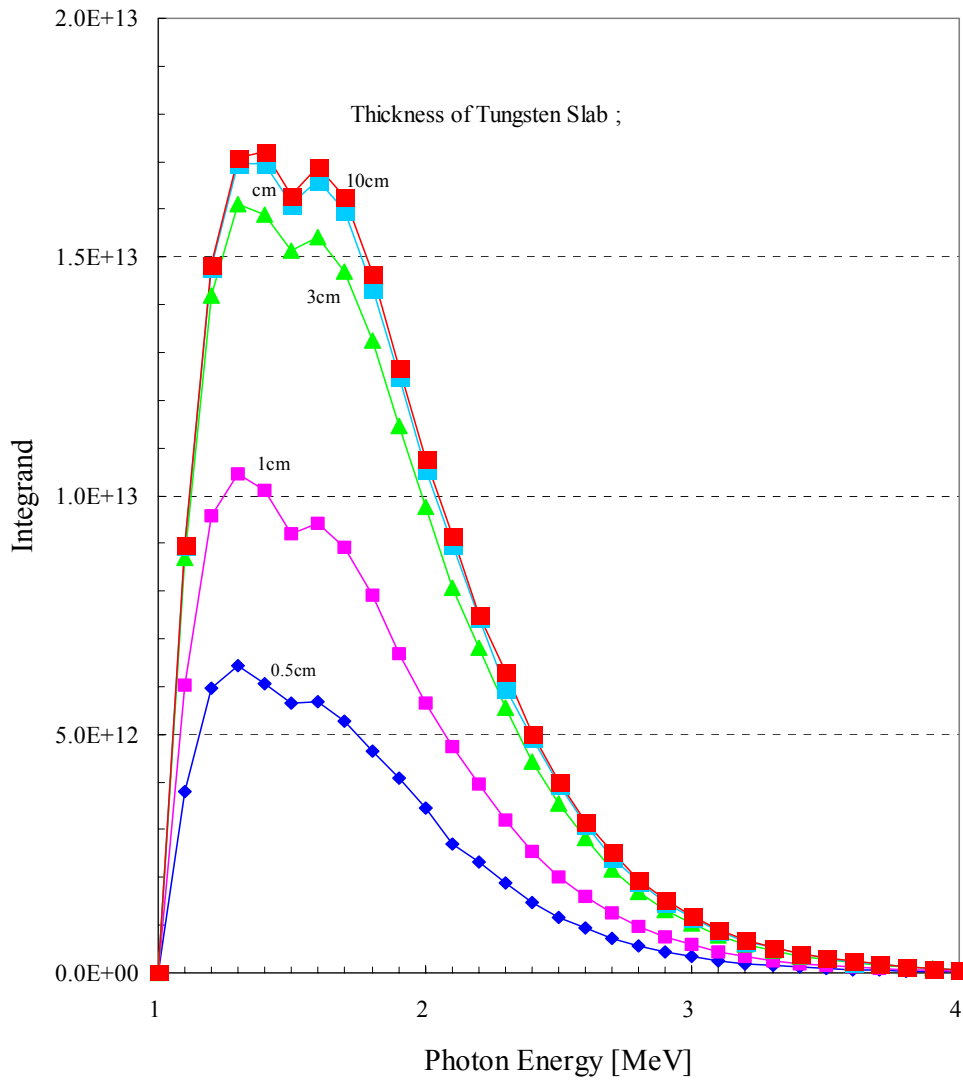


Fig. 3; Estimated Conversion Process of Photon to Positron

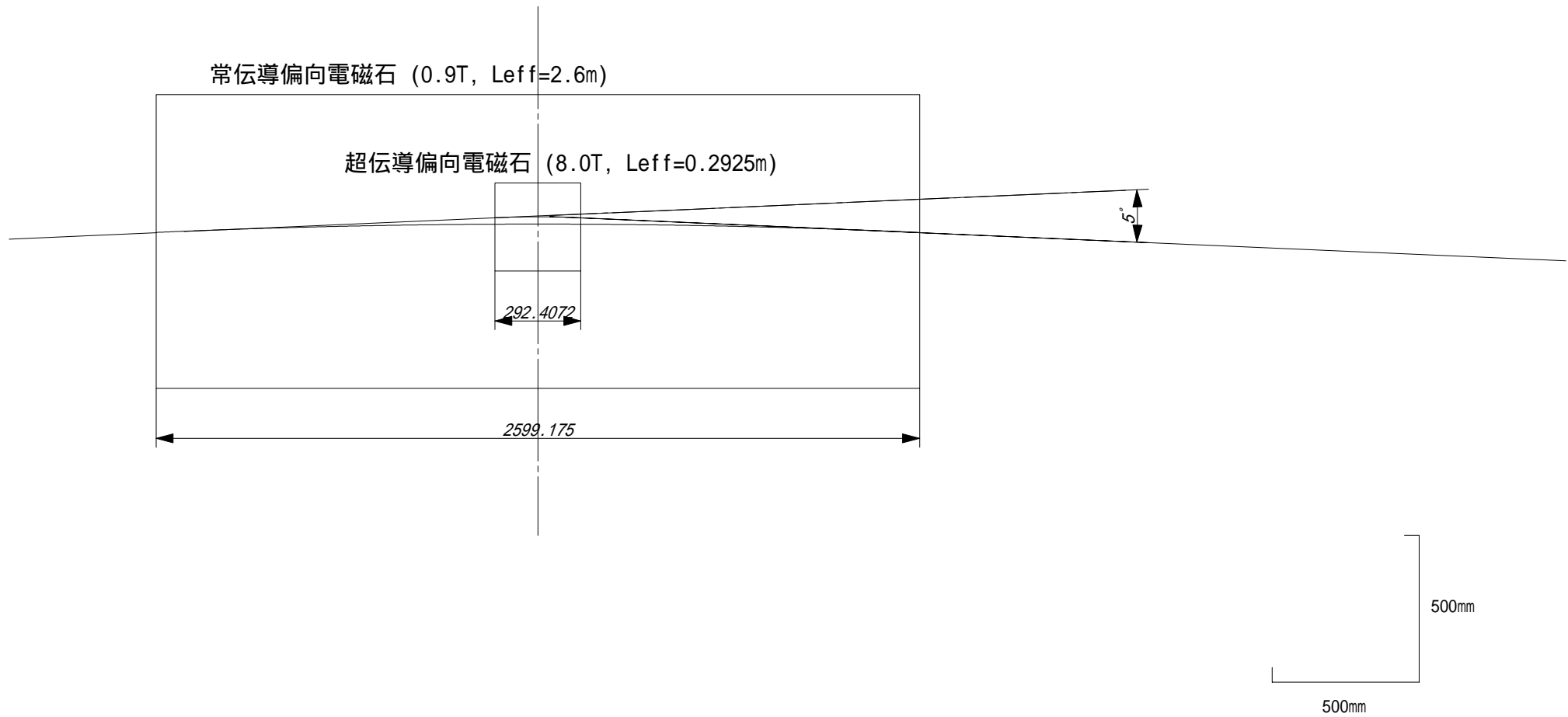
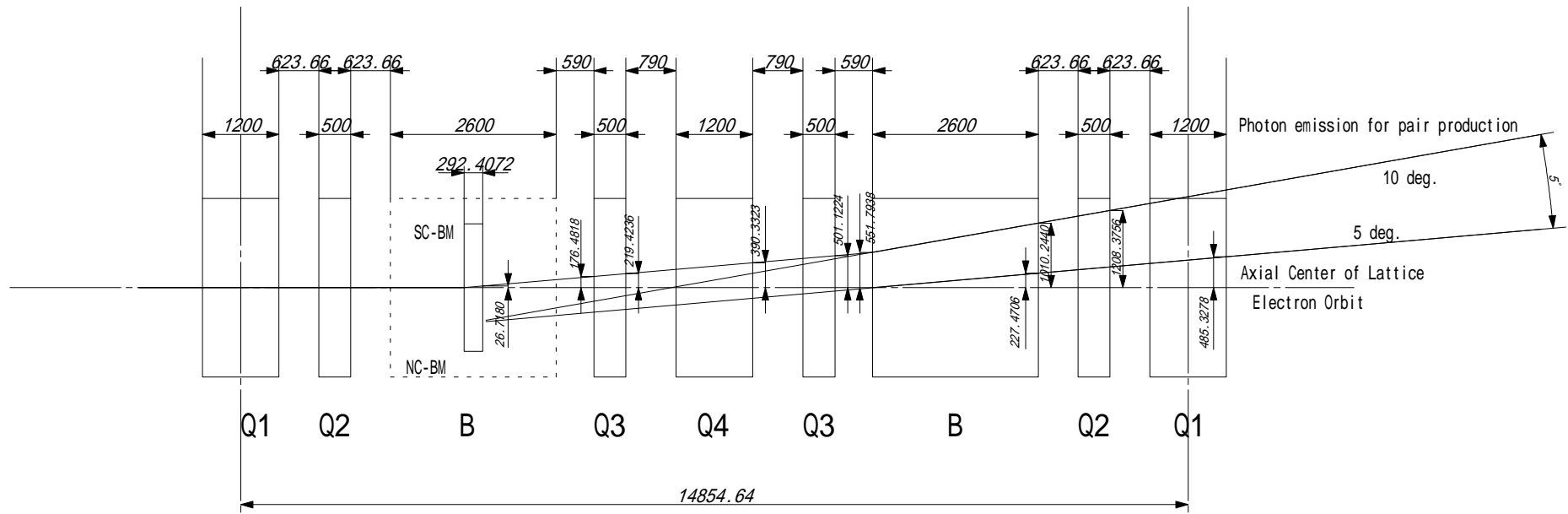


Fig. 4; Exchange Normal-conducting Bending-Magnet with Super-conducting Bending-Magnet



単位 ; mm

e+BM_2.zrd

March 2, 1999

Fig. 5; Interference Lattice Magnets with Photon emitted from Super-conducting Bending-Magnet.

Photon Energy dep. on Emitted Angle
 $E_e=8$ GeV, $k_1=10.6\mu\text{m}$

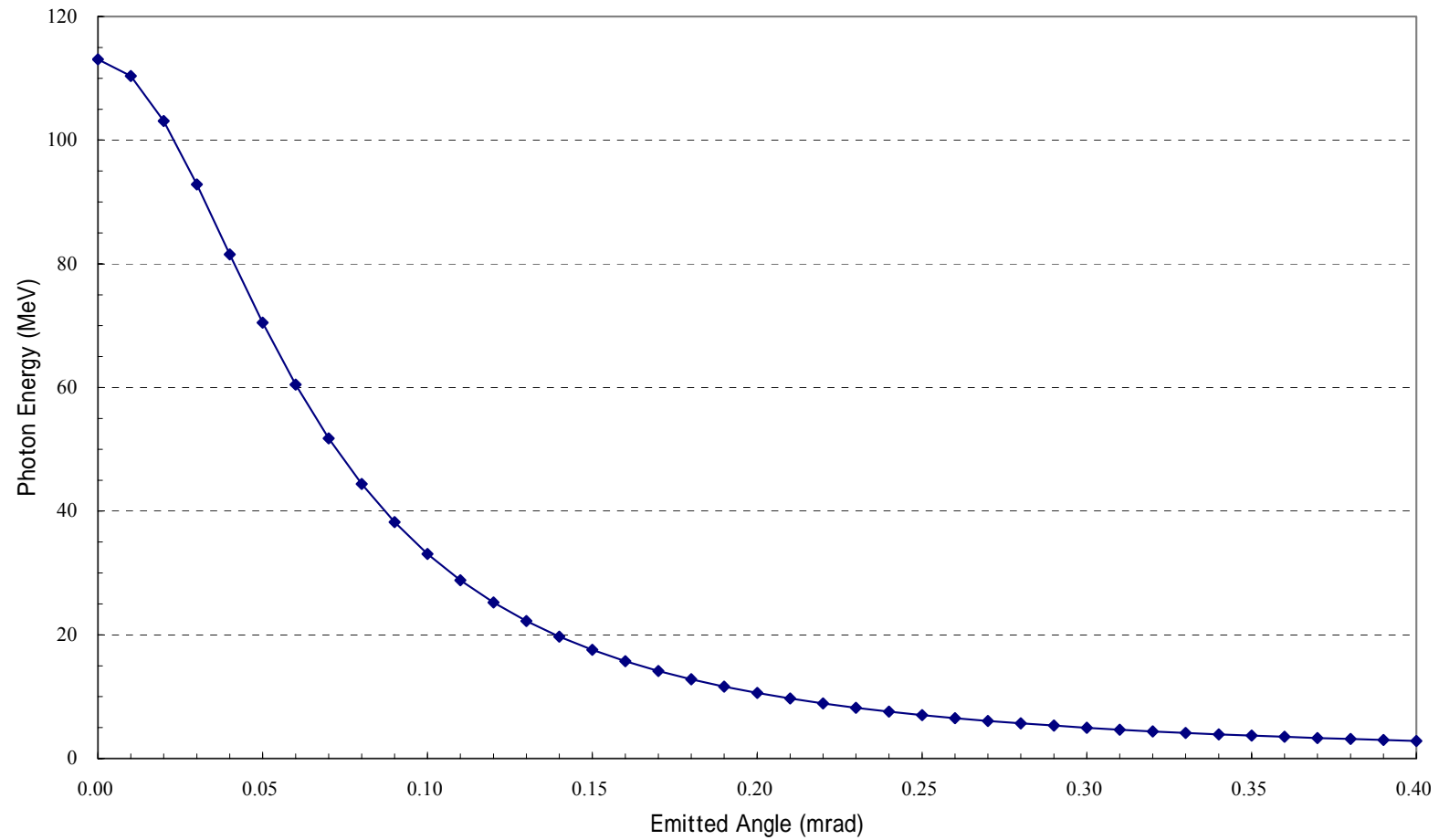


Fig. 6; Emitted Laser-induced-Photon Energy produced with 8-GeV Electron and 10.6- μm Laser.

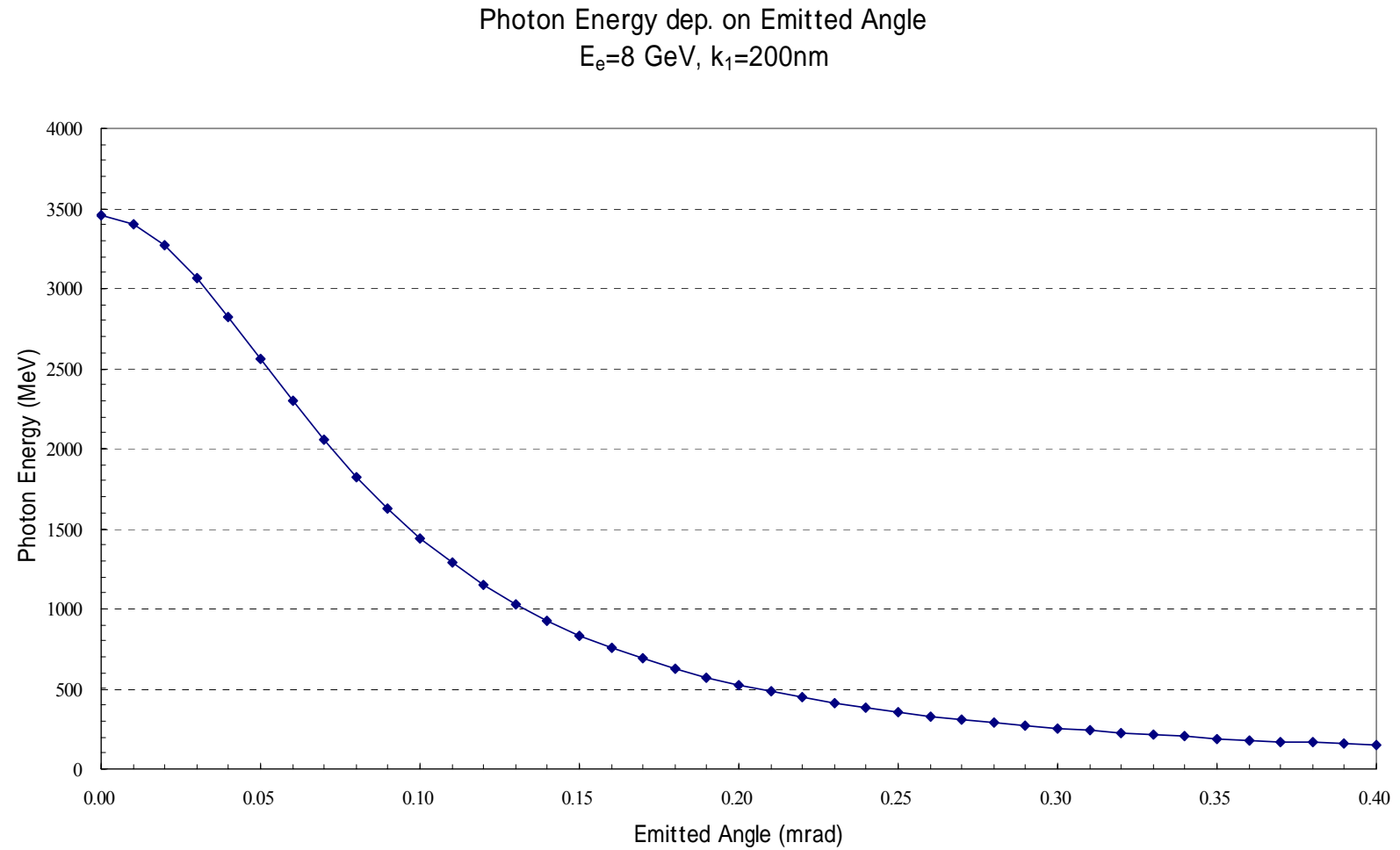


Fig. 7; Emitted Laser-induced-Photon Energy produced with 8-GeV Electron and 200-nm Laser.

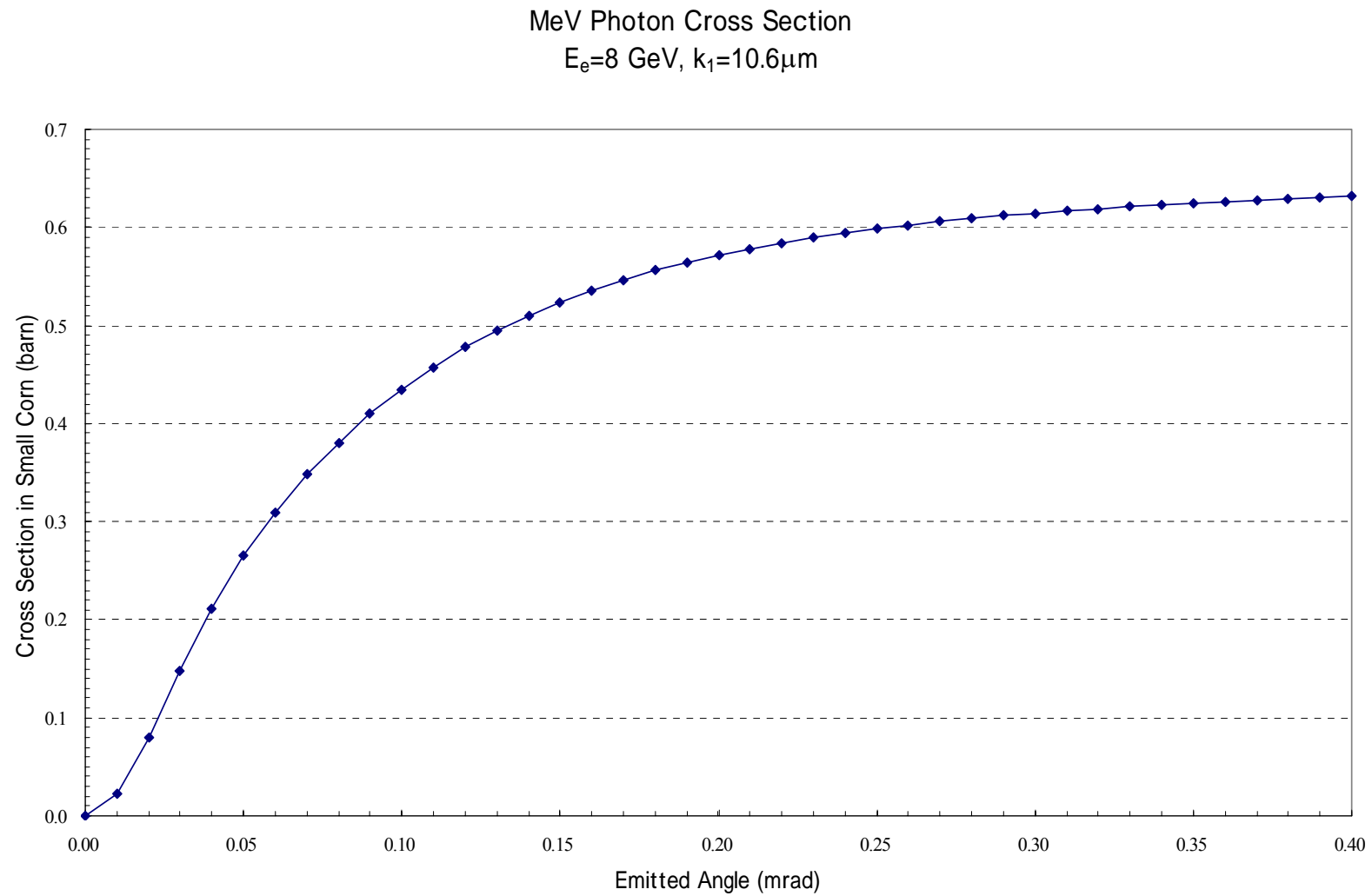


Fig. 8; Cross Section of MeV Photon in Small Corn produced with 8-GeV Electron and 10.6- μm Laser.

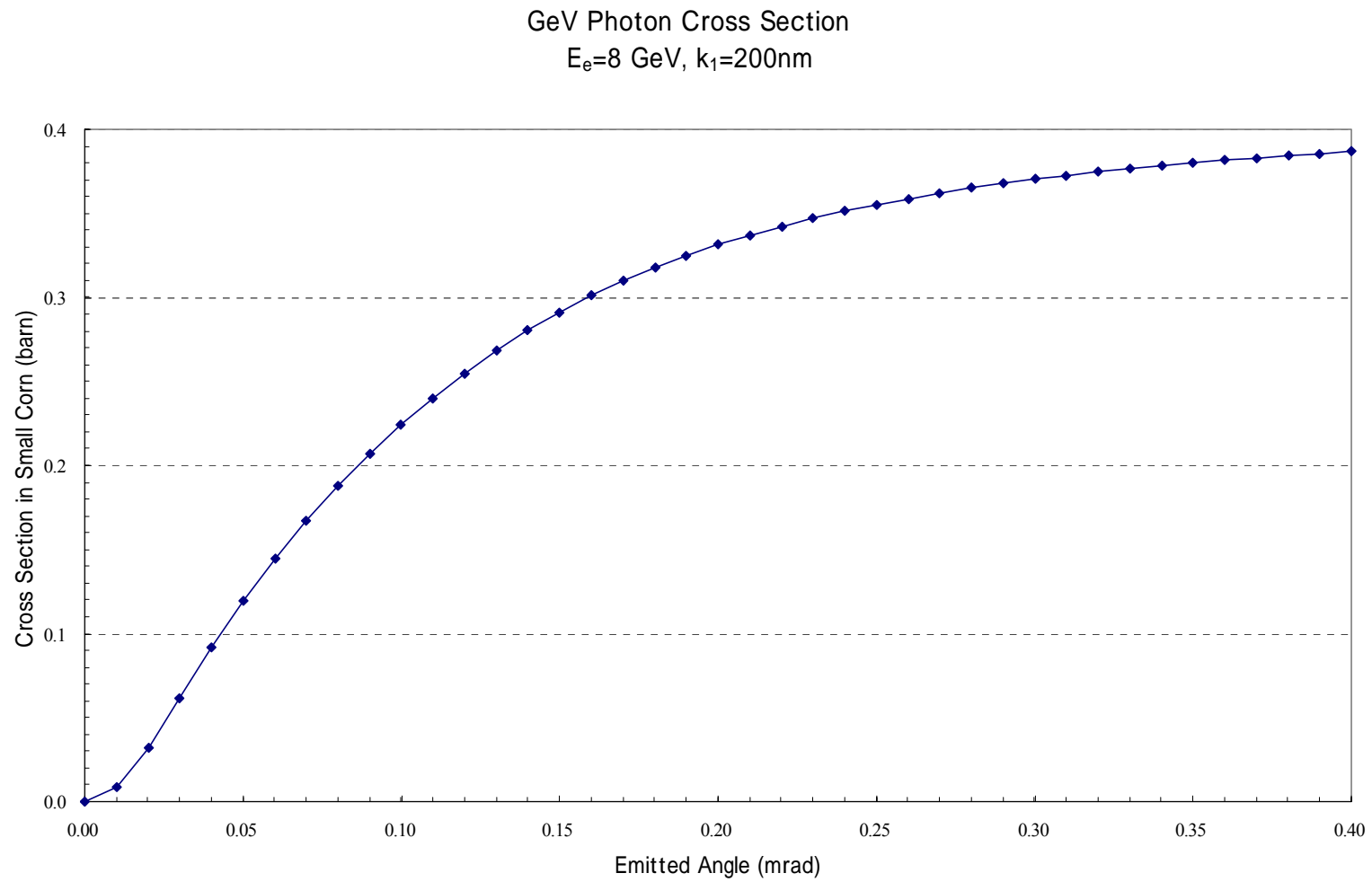


Fig. 9; Cross Section of GeV Photon in Small Corn produced with 8-GeV Electron and 200-mm Laser.

Maximum Energy of Laser-Electron Photon Incident-Photon Dependence

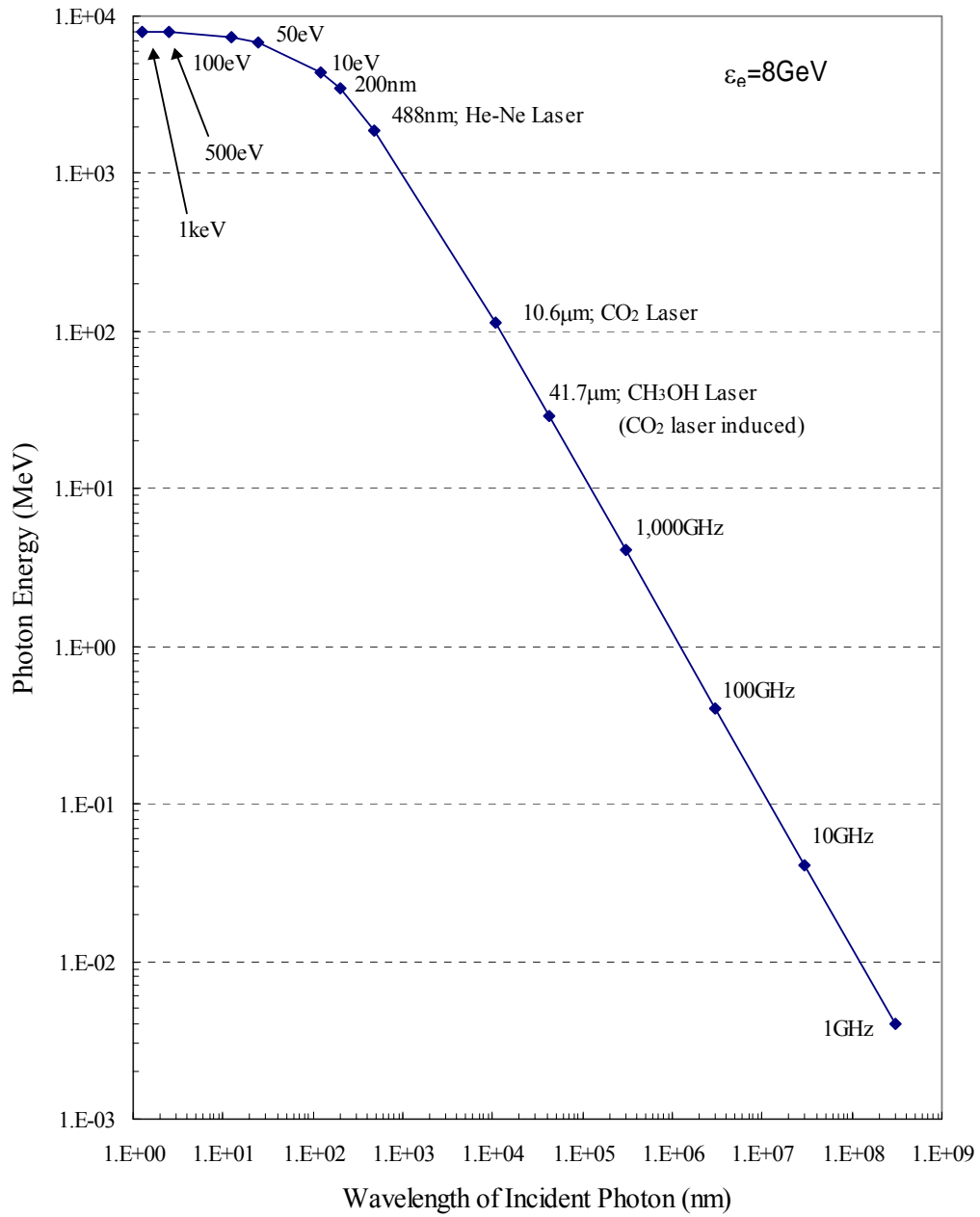
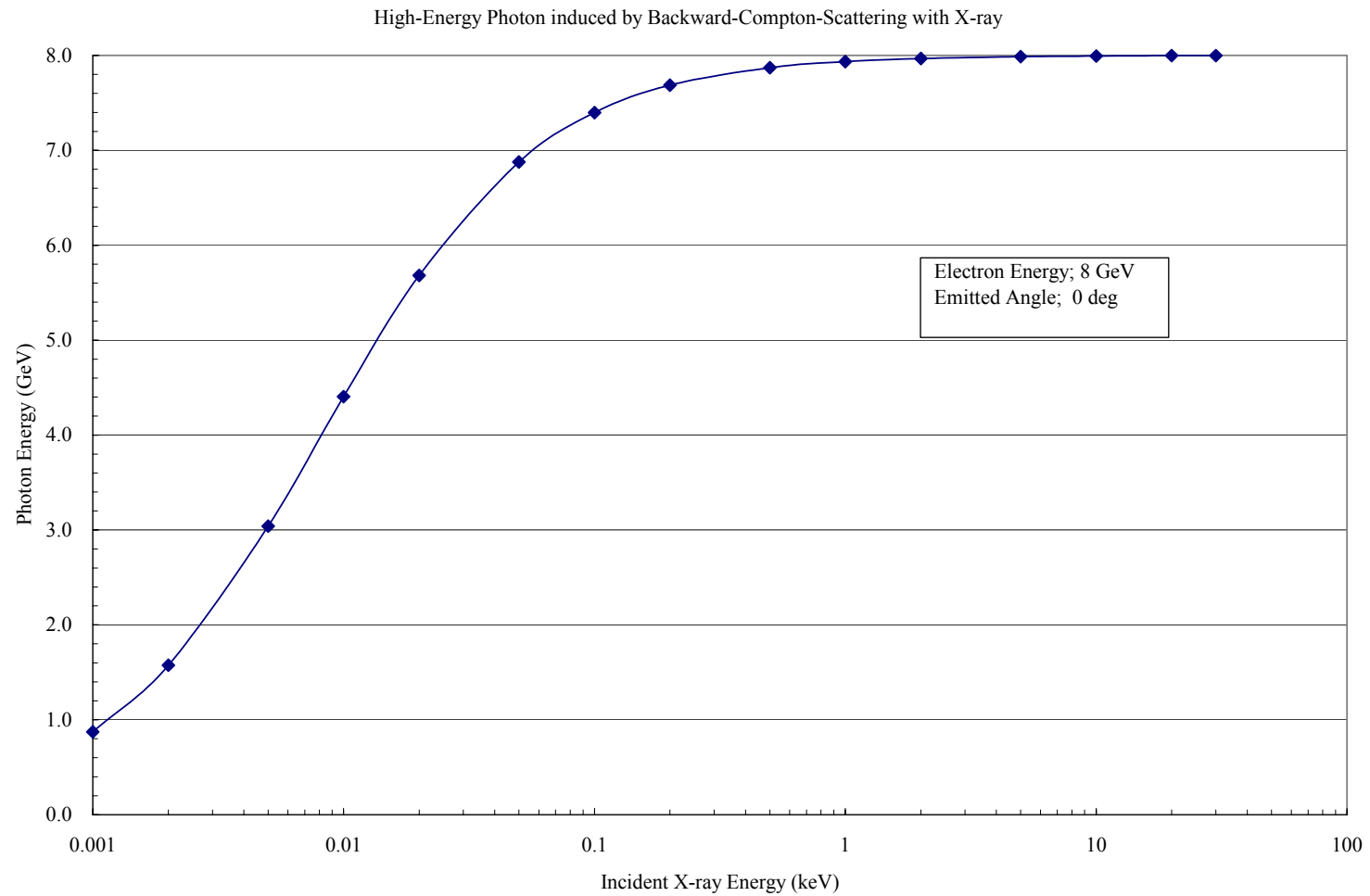


Fig. 10; Maximum Energy of Laser-Electron Photon dependence on Incident Photon Energy.

Fig. 11; High-Energy γ -Ray Production

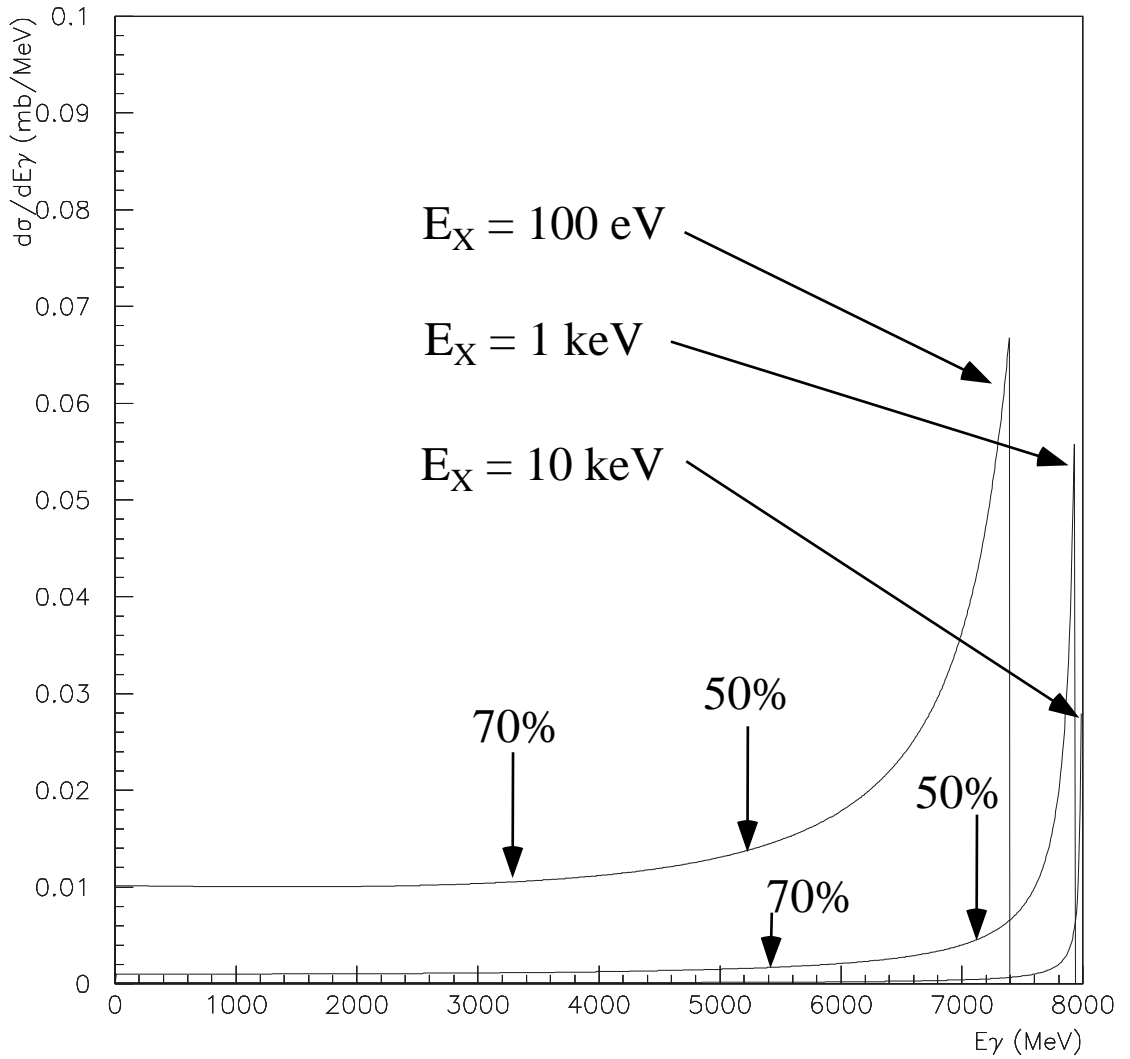


Fig. 12 Quasi-monochromatic energy distribution of γ -rays in high energy. CBS.

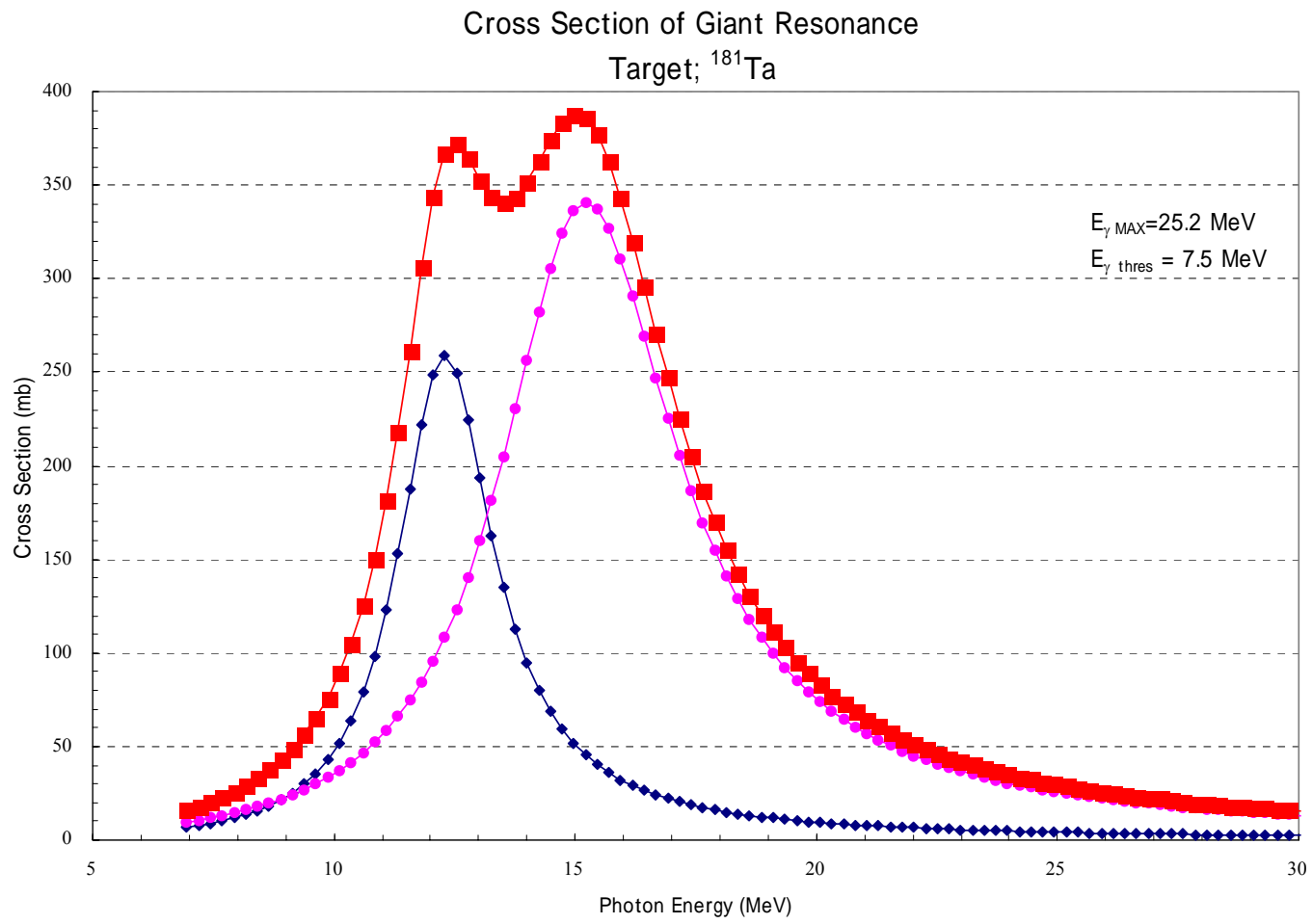
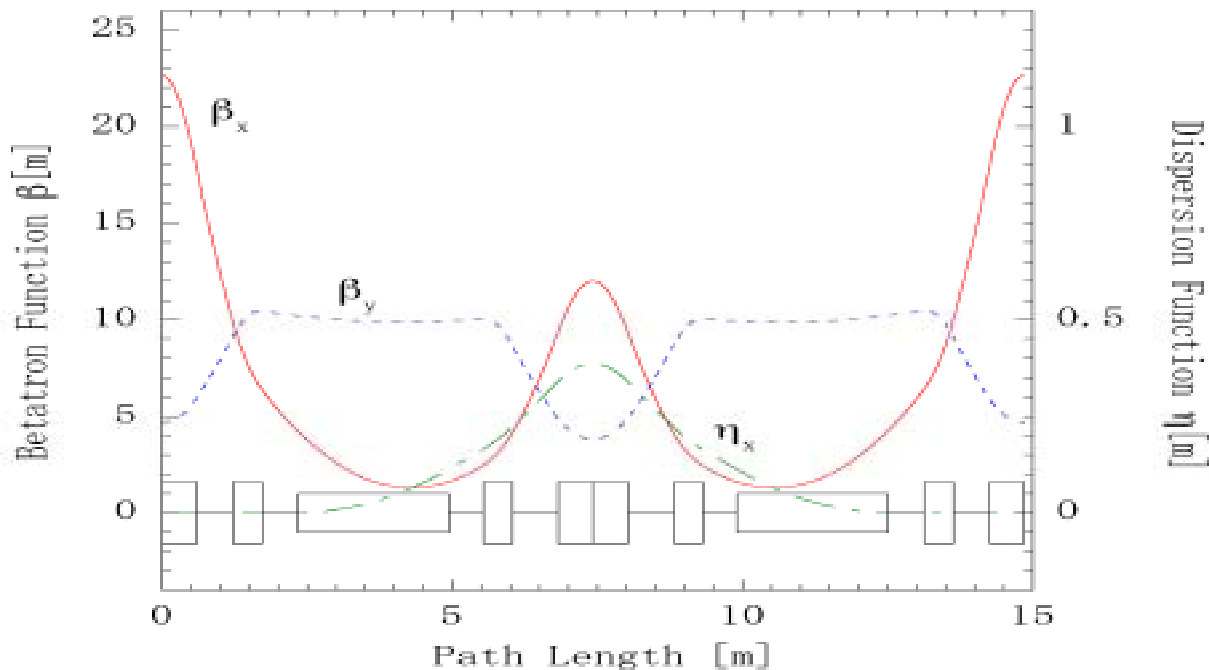


Fig. 13; Cross Section of Neutron Emission due to Giant Resonance of ^{181}Ta

Normal Operation Mode

Q1: +0.632138 [m⁻²]
 Q2: -0.649109 [m⁻²]
 Q3: -0.641468 [m⁻²]
 Q4: +0.668397 [m⁻²]

Emittance: 16.75[nmrad] (8GeV)
 Momentum Compaction Factor: +4.44 × 10⁻⁴



“Negative-Alpha” Operation Mode

Q1: +0.658854 [m⁻²]
 Q2: -0.641012 [m⁻²]
 Q3: -0.500037 [m⁻²]
 Q4: +0.668397 [m⁻²]

Emittance: 39.47[nmrad] (8GeV)
 Momentum Compaction Factor: -1.24 × 10⁻⁴

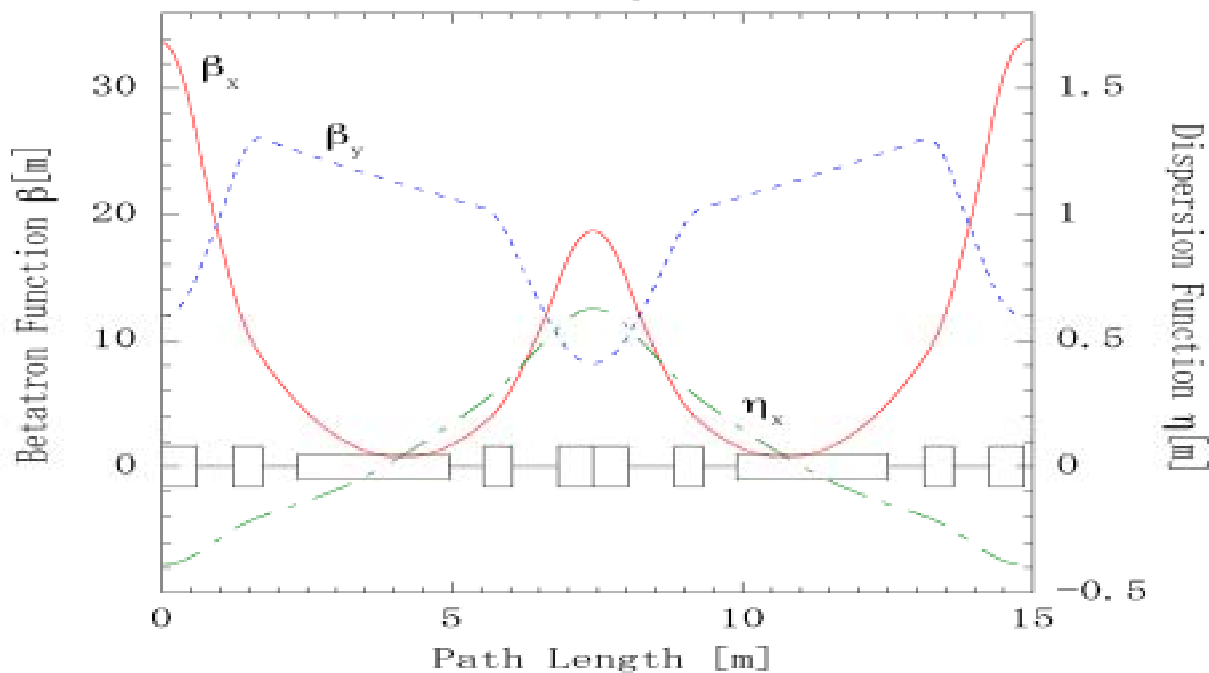


Fig. 14; Lattice Survey of HFR

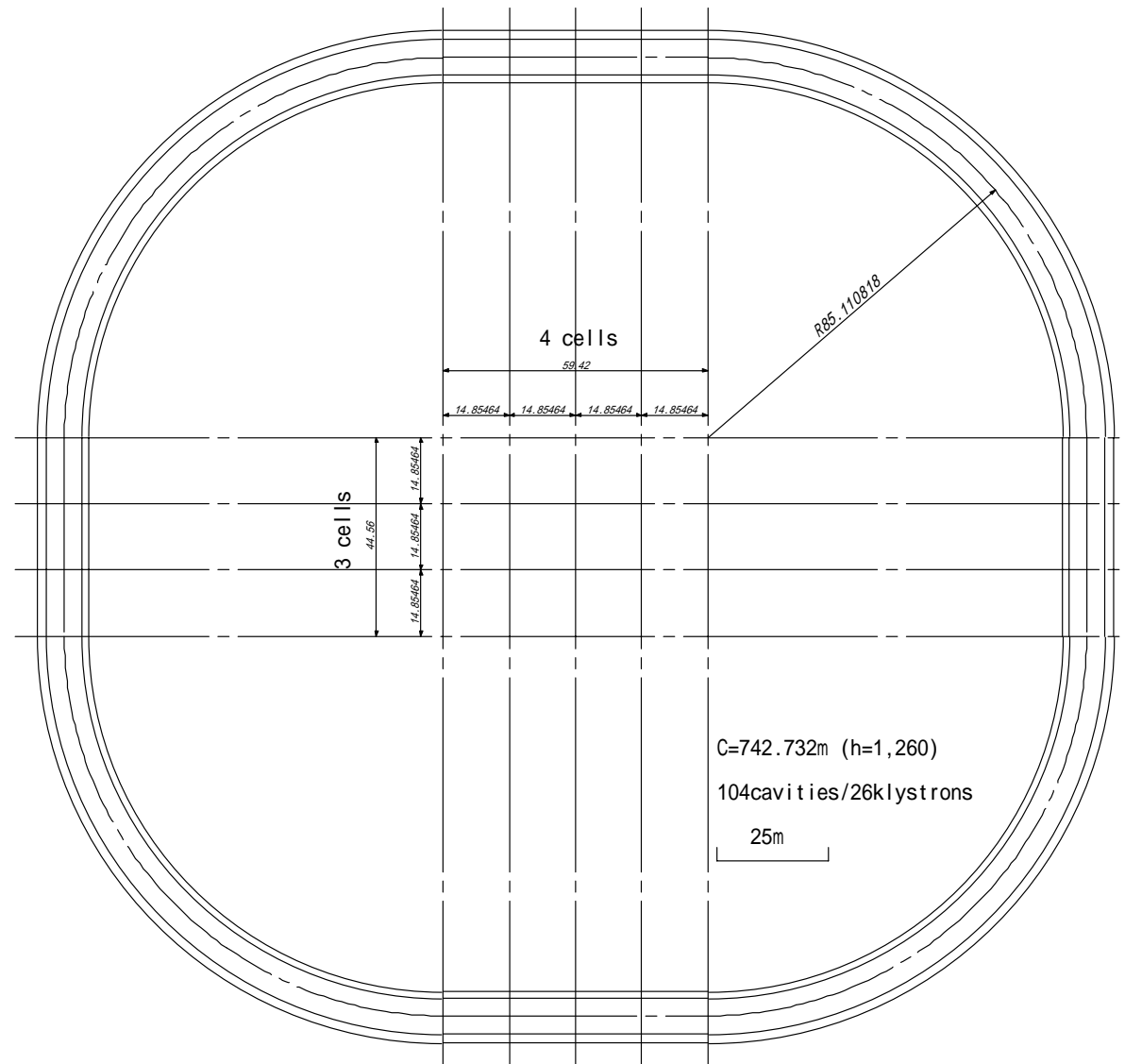
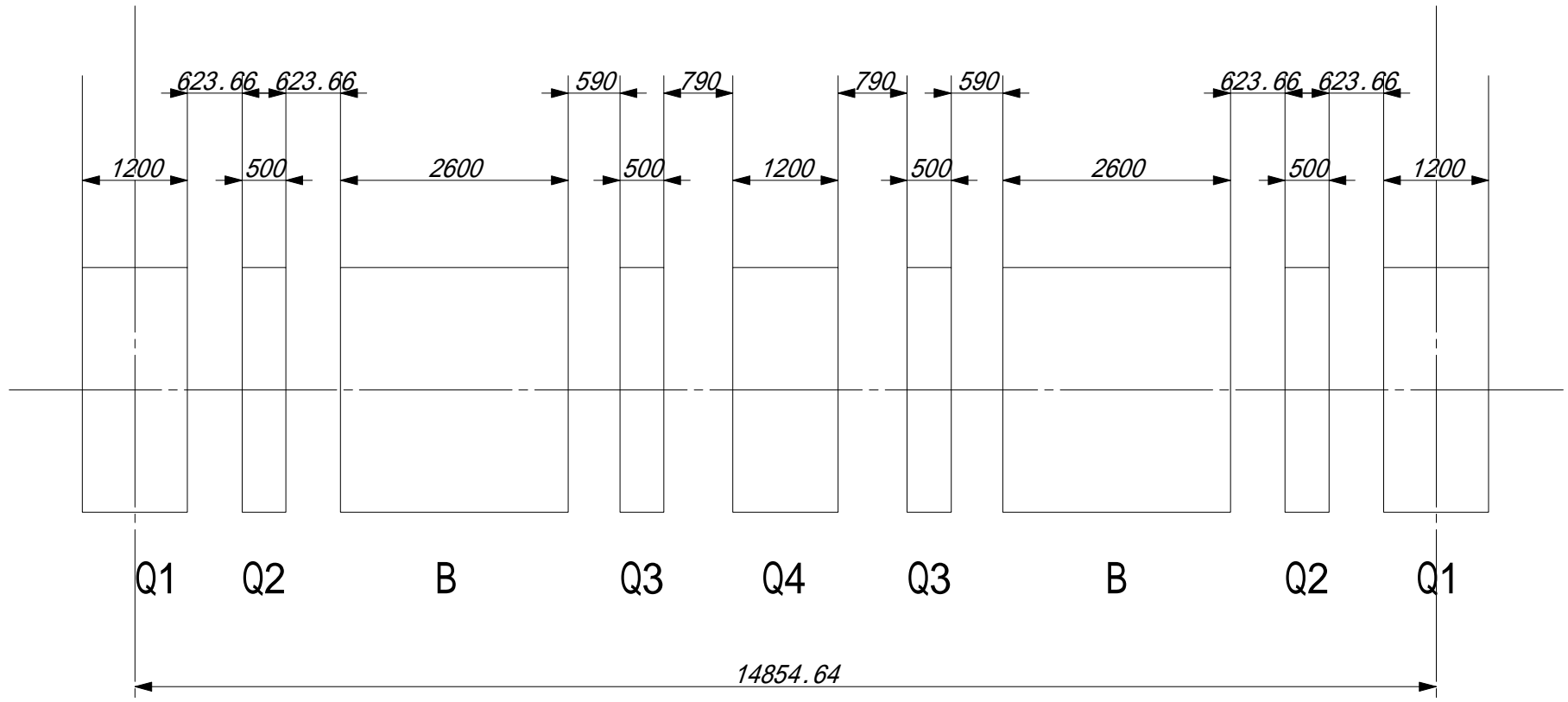


Fig. 15; Outline of HFR



单位 ; mm

Fig. 16 Lattice Structure

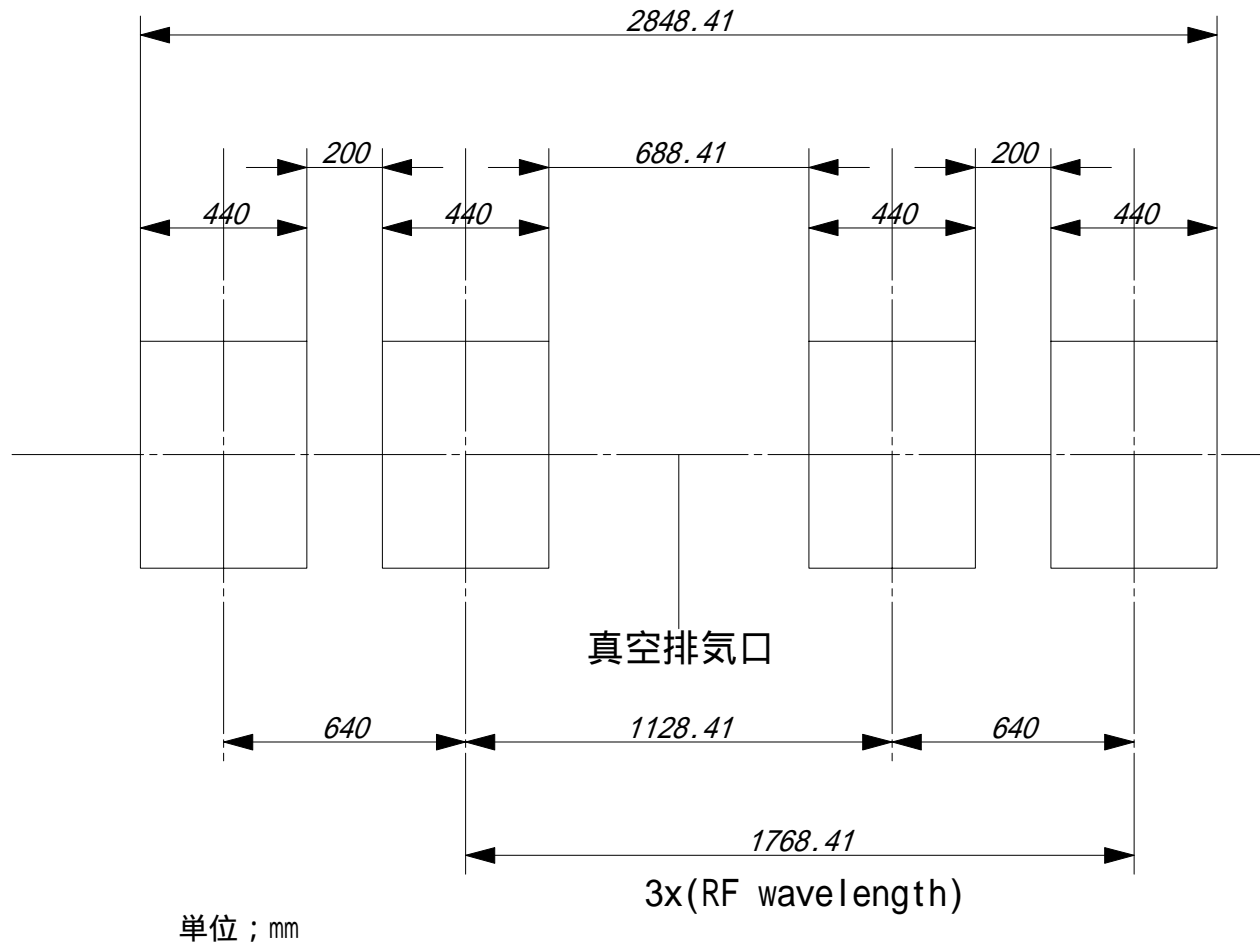


Fig. 17; RF cavities installed.

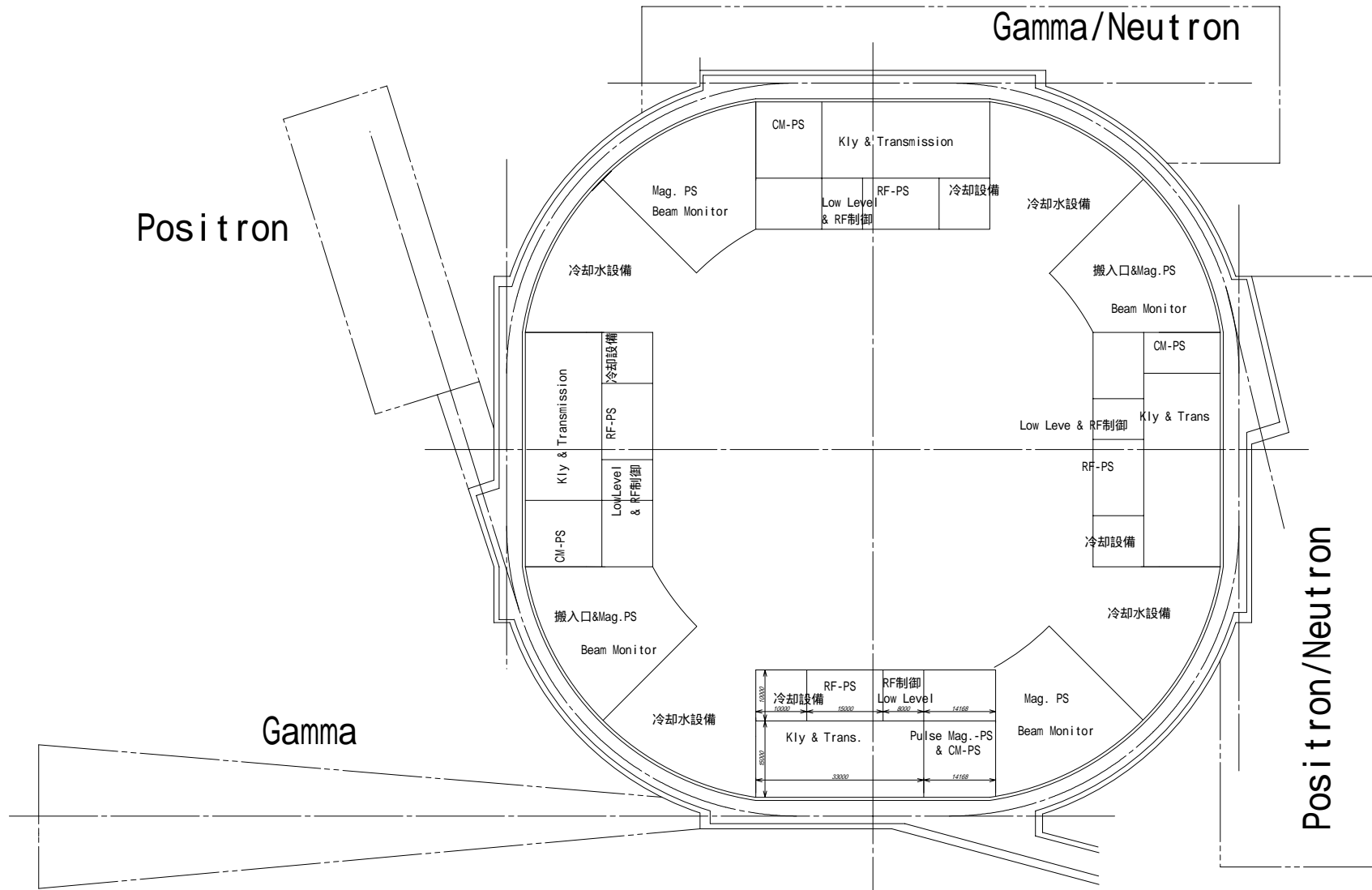


Fig. 18; Layout of HFR & Facilities

HFR Construction Schedule

1998, October 02, Yoneh rev. 2000, September 18

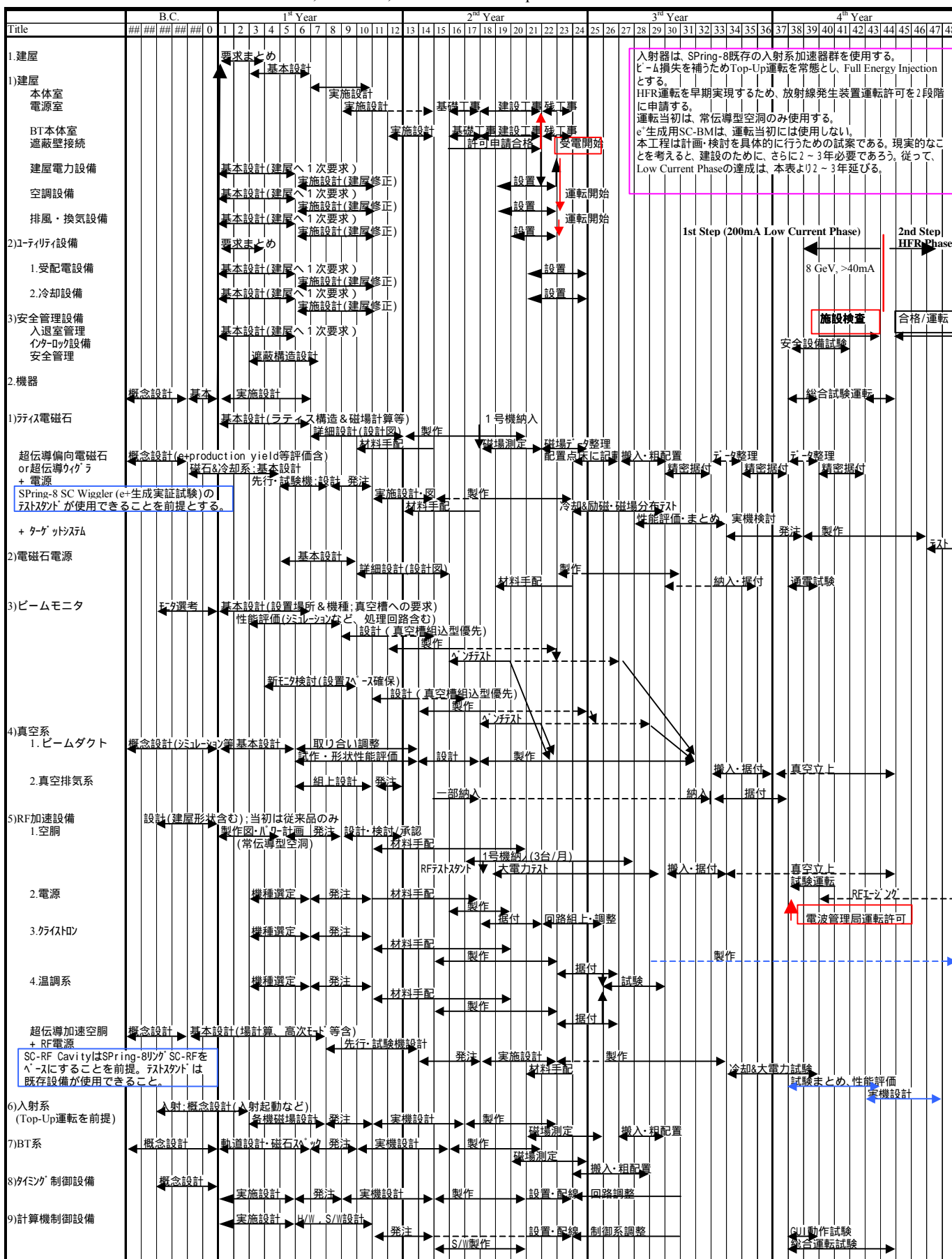


Fig. 19; 1st Phase of HFR Construction Schedule