

# CONCEPTUAL DESIGN STUDY ON SUPERCONDUCTING PROTON LINAC FOR NEUTRON SCIENCE PROJECT

Y. Honda\*, K. Hasegawa, N. Ouchi, J. Kusano, and M. Mizumoto

Japan Atomic Energy Research Institute. \*Mitsubishi Heavy Industries, LTD.  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

## Abstract

The Neutron Science Project has been proposed with the superconducting proton linac for the energy range from 100MeV to 1.5GeV. The studies of the superconducting linac structure and the beam dynamics simulation are performed.

## 中性子科学研究用超伝導陽子リニアックの概念設計検討

### 1. はじめに

原研が進めている中性子科学研究計画では、100MeV から 1.5GeV までのエネルギー範囲に超伝導陽子リニアックを適用することを検討しており<sup>1)</sup>、加速器規模を把握するための概念設計検討が行われている。ここでは、加速器構成検討のために行った同一種類のキャビティが受け持つエネルギー範囲(以下  $\beta$  セクションと呼ぶ)と加速セル長( $\beta_c \cdot \lambda / 2$ ,  $\lambda$ : 波長、 $\beta_c$ : セルのジオメトリカル  $\beta$ ) の検討、キャビティパラメータとラティス構成の検討及びビームシミュレーション結果について報告する。現状で想定している加速器基本パラメータは表1に示すように、加速周波数 600MHz、ビーム・ピーク電流 30mA、表面最高電界 ( $E_{peak}$ )16MV/m、加速粒子は  $H^+$  及び蓄積リングへ入射される  $H^-$  である。

### 2. $\beta$ セクション分割と加速セル長

陽子加速器では、陽子のエネルギーが 100MeV から 1.5GeV まで増すに従って陽子の光速度比:  $\beta$  は 0.43

表 1 基本パラメータ等

|            |               |            |               |
|------------|---------------|------------|---------------|
| 周波数        | 600MHz        | セル数/キャビティ  | 5             |
| エネルギー範囲    | 100MeV~1.5GeV | 加速位相       | -30°          |
| $E_{peak}$ | 16MV/m        | ビーム収束方式    | Q マグネット・ダブレット |
| ビーム電流      | 30mA          | キャビティ数/収束系 | 2             |
| 加速粒子       | $H^+, H^-$    |            |               |

から 0.92 に変化するので、加速セル長を陽子のエネルギーに合わせて変える必要がある。 $\beta$  セクションの分割は細かくするほど加速ゲインを高くとれ加速器長が短くでき、モジュール数を少なくできるという利点があるのに対し、量産効果が減少する、トランジションが多くなる、必要なスペア数が多くなるといった欠点がある。超伝導部の加速器長は敷地の制約上 700m 程度にすることが要請されており、必要な加速ゲインを得るために現段階では  $\beta$  セクション分割数を8として検討した。

各  $\beta$  セクションでは同一種類のキャビティで粒子を加速するため粒子速度と空洞長が同期しないところでは位相のずれが生じる。各  $\beta$  セクションのエネルギー範囲はこの位相のずれの最大値が特定の  $\beta$  セクションで突出することにならないように、つまり互いにほぼ同じになるようにした。

また、各  $\beta$  セクションのセル長は次の条件で加速器長が短くなるように求めた。(1) $E_{peak} \leq 16MV/m$ , (2)空洞中心軸上の電場分布は空洞中心を原点とし2セルを1周期とする  $\cos$  で表せ、ビーム・ハイフへの漏れは無いとする、(3) $E_{peak}/E_0$ ( $E_0$ : 加速電界)を系統的に扱えるようにするため、空洞のアリス曲線部をセル長に比例させる、(4)平均キャビティ間距離を 1.5m 程度とする。以上の条件から  $\beta_c$  は表 2 に示すように求まり、 $\beta$  セクションのエネルギー区分は 100-126-160-205-269-362-511-782-1500 MeV と求められた。

### 3. キャビティ・パラメータとラティス構成

RF 分岐の観点より同じ  $\beta$  セクションではキャビティのエネルギー・ゲインを一定に割り当てた。同期位相が  $-30^\circ$  で一定であり、同じ  $\beta$  セクションではキャビティ長が一定であるため、エネルギー・ゲインを一定とするためには加速電界  $E_0 \times$  トランジット・タイムファクタ  $T$  が一定にすればよい。Epeak は最大 16MV/m で与えられ、Epeak/ $E_0$  がキャビティ形状で定まる値であるため  $E_{max}$  が求まる。加速器長を短くするには  $T$  の最小値  $T_{min}$  に  $E_{max}$  を適用することになり、これによりキャビティのエネルギー・ゲインが求まる。各キャビティの  $E_0$  は粒子速度に対するトランジット・タイム・ファクタを求めて次式より得られる。

$$E_0 \cdot T = E_{max} \cdot T_{min} = \text{constant} \quad (\text{式 1})$$

前節ではビーム・パイプへの電場の漏れが無いものとしたが、実際にはビーム・パイプへの電場の漏れは存在し加速効率を下げる要因となっている。従ってこれ以降の検討では SUPERFISH により5連セルの電場分布を求め、電場分布より得たトランジット・タイム・ファクタを用いた。 $E_{max}$  は SUPERFISH より求めた Epeak/ $E_0$  と Epeak  $\leq 16$  MV/m より得た。以上の条件から求めたキャビティ・パラメータを表 2 に示す。エネルギー区分が前節と若干異なるのはキャビティ数を RF 分割のため4の倍数にする必要があったためである。キャビティの総数の見積もりは308個となった。

次にラティス構成であるが、収束系は図1に示すようにダブレットを採用し、1収束区間に2キャビティを配置した。

表 2 キャビティ・パラメータ

|                   |                 |                 |                 |                  |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| $\beta$ セクション No. | 1               | 2               | 3               | 4                |
| $\beta_0$         | 0.453           | 0.499           | 0.549           | 0.604            |
| キャビティ数            | 20              | 24              | 24              | 24               |
| エネルギー範囲 [MeV]     | 100~<br>123.5   | 123.5~<br>159.9 | 159.9~<br>209.8 | 209.8~<br>276.2  |
| Eacc [MV/m]       | 2.45            | 2.86            | 3.56            | 4.30             |
| Power/キャビティ [kW]* | 21              | 27              | 38              | 50               |
| $\beta$ セクション No. | 5               | 6               | 7               | 8                |
| $\beta_0$         | 0.665           | 0.732           | 0.805           | 0.886            |
| キャビティ数            | 24              | 32              | 52              | 108              |
| エネルギー範囲 [MeV]     | 276.2~<br>361.2 | 361.9~<br>502.3 | 502.3~<br>782.2 | 782.2~<br>1504.7 |
| Eacc [MV/m]       | 5.01            | 5.59            | 6.23            | 7.03             |
| Power/キャビティ [kW]* | 64              | 79              | 97              | 121              |

\*:ビーム電流は 30mA (ビーク電流)  $\times 0.6$  (チャッピング・ファクタ) = 18mA.

4極磁石の磁場勾配は図2に示されるように 4.2~7.1 T/m であり、これは Equipartitioning 条件、すなわち次式が成立するように求めた。<sup>2)</sup>

$$\frac{\gamma_0 (\epsilon_{nz} / a)}{(\epsilon_{nz} / z_m)} = 1 \quad a, z_m: \text{横, 縦の有効ビーム半径,}$$

$$\epsilon_{nz}, \epsilon_{nz}: \text{横, 縦の有効規格化エミッタンス (式2)}$$

各  $\beta$  セクション間には横方向のマッチング・セクションを配置し、4つの4極磁石の磁場勾配を TRACE3D で求めた。

加速粒子 H<sup>-</sup>イオンの外側にある電子はある程度の磁場を通過すると剥ぎ取られてしまい H<sup>0</sup>原子となる(ローレンツ・ストリッピング)。4極磁石の磁場は中心軸から離れるほど大きくなるのでビーム通過が想定される領域の境界でローレンツ・ストリッピングの影響を抑えるように収束系及びマッチング・セクションの磁場勾配を設定する必要がある。図3は中心軸から5cm離れたところの H<sup>-</sup>減少率を  $10^{-6}$ ,  $10^{-7}$ ,  $10^{-8}$ /mとした場合のエネルギーと許容される磁場勾配の関係を示しており<sup>3)</sup>、ここでは H<sup>-</sup>減少率が  $10^{-7}$ /m 以下になるように磁場勾配を設定した。

加速器長の見積もりは図1のような収束系の構成で、マッチング・セクションを含めて 733m となった。加速器長を 700m 以下にするためには Epeak やキャビティ数/収束区間の見直しをする必要がある。

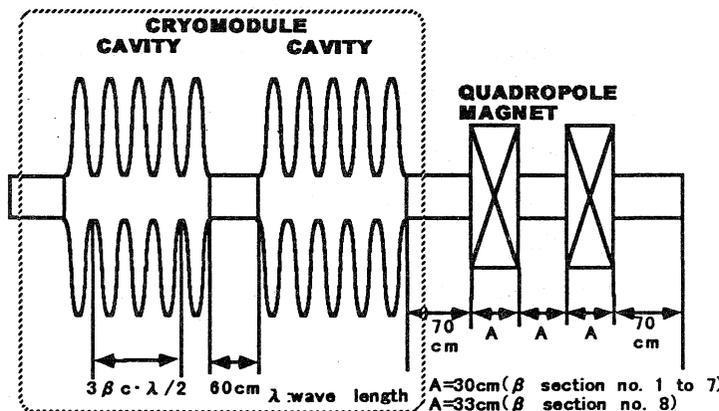


図1 収束系の構成

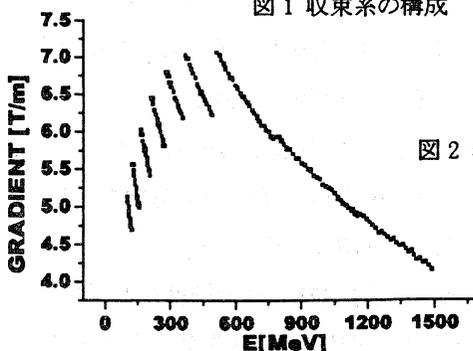


図2 収束系磁場勾配

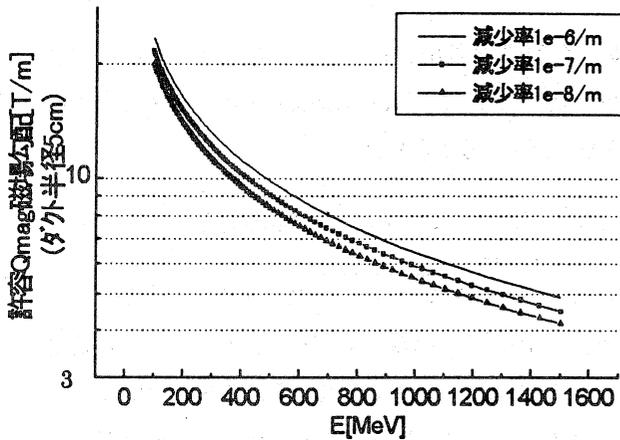


図3 エネルギーと磁場によるH<sup>-</sup>減少率

RF 壁ロスについては、実験値<sup>4)</sup>をもとに4K 運転の場合  $R_s=400\Omega$ 、2K 運転の場合  $R_s=20\Omega$  と仮定して見積もった結果、それぞれ 70kW(4K)、3.4kW(2K)となった。この見積もりについては今後継続される実験により精度を上げる必要がある。

#### 4. ビーム・シミュレーション

ビーム・シミュレーションは PARMILA を超伝導空洞用に改修しビームパイプへの電場の漏れを考慮して行った。図4にシミュレーションの1例を示す。上流の DTL と超伝導加速器との間には 200MHz から 600MHz への周波数ジャンプがあるため入射ビームの電流値を  $30\text{mA} \times 3 = 90\text{mA}$  としてシミュレーションを行った。周波数ジャンプによるエミッタンス増加は検討途中であり、入射ビームの横と縦の rms エミッタンスは DTL からのエミッタンスに余裕をみて各々  $0.080 \pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$ 、 $0.86 \pi \text{ MeV} \cdot \text{deg}$  とおいた。シミュレーションの結果、1.5GeV ビームの横と縦の rms エミッタンスはそれぞれ  $0.083 \pi \text{ cm} \cdot \text{mrad}$ 、 $0.89 \pi \text{ MeV} \cdot \text{deg}$  となり、エミッタンス増加を抑制する Equipartitioning の効果を確認できた。

#### 5. おわりに

中性子科学研究用超伝導リニアックの加速器構成とビーム・シミュレーションに関する概念検討の現状をまとめた。今後の課題として下記のことが挙げられる。

- 1)  $\beta$  セクション分割、 $\beta_0$  を見直し加速効率の高める。
- 2) 収束区間のキャピティ数をビーム・ダイナミクスに影響を与えない程度に見直し、加速器長を短くする。
- 3) 超伝導空洞実験データを反映し、設計精度を上げる。
- 4) 構成要素の故障率を加味したシステム構築とビーム・ダイナミクスの検討を行う。

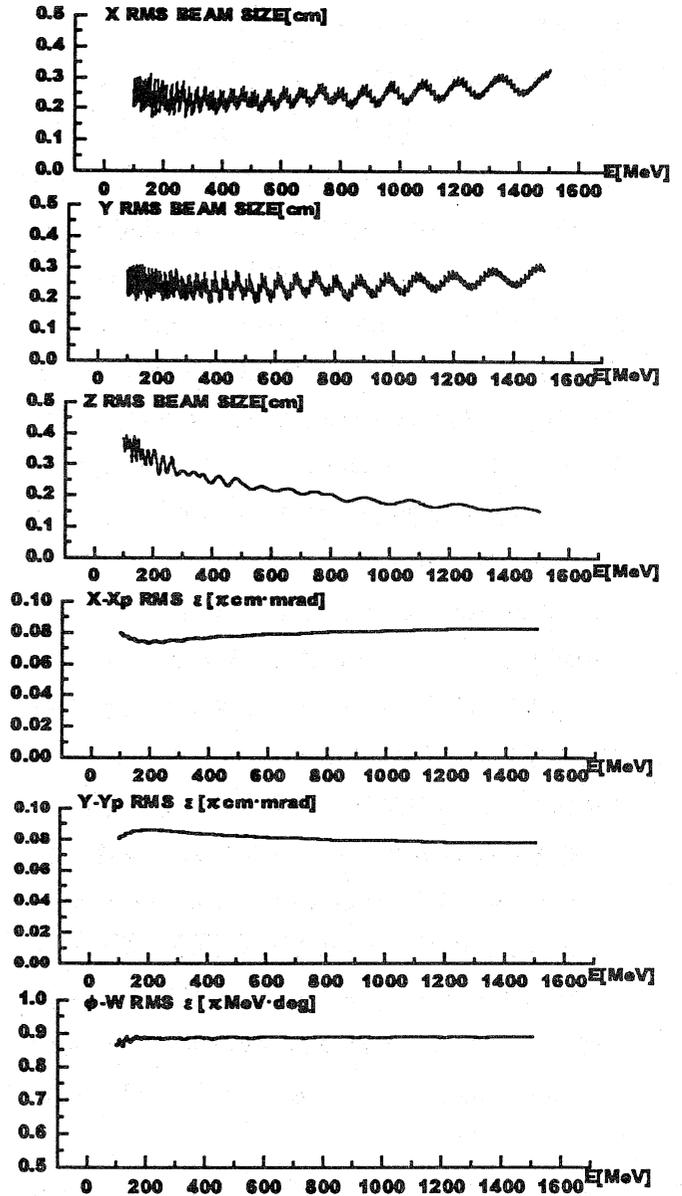


図4 シミュレーション例

#### 参考文献

- 1) Mizumoto M, et al.: "DEVELOPMENT OF HIGH INTENSITY PROTON ACCELERATOR FOR NEUTRON SCIENCE RESEARCH PLAN", Proceedings of the 21<sup>st</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan(1996)
- 2) Reiser M.: "THEORY AND DESIGN OF CHARGED PARTICLE BEAMS", JOHN WILEY & SONS, INC., 573(1994)
- 3) Jason J.A, et al.: "NEUTRALIZATION OF H<sup>-</sup> BEAMS BY MAGNETIC STRIPPING", IEEE TRANS. ON Nucl. Sci., NS-28, 2704(1981)
- 4) Ouchi.N., et al. "Fabrication and Test of a Superconducting Single Cell Cavity for the High Intensity Proton Linac", these proceedings.