

20-P29

## Development of Q-triplets for Interdigital-H Linac

M.Doi, S.Arai\*, T.Katayama\*, M.Tomizawa\*, K.Niki\*, T.Hattori\*\*, M.yoshizawa\*

Engineering Research Center, NKK Corporation

1-1 Minamiwatarida, Kawasaki-ku, Kawasaki-shi, 210 Japan

\*Institute for Nuclear Study, University of Tokyo

3-2-1 Midori-cho, Tanashi-shi, Tokyo, 124 Japan

\*\*Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology

Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo 152 Japan

## Abstract

In the prototype facility of the Exotic-arena at INS, unstable nuclei with a charge-to-mass ratio greater than 1/10 is accelerated from 170 to 1046 keV/u by an interdigital-H linac. IH linac consists of four tanks and three Q-triplets placed between tanks. In this type, the length of Q-triplets should be as short as possible in order to obtain a large longitudinal acceptance. The Q-triplet with high gradient and compact size was designed by 2D and 3D computer codes. A prototype model of the Q-triplet was constructed. The field measurement with a hole probe, carried out.

## IHリニアック用三連四極電磁石の開発

## 1. はじめに

大型ハドロン計画のEアテナ準備研究として短寿命核分離加速実験装置の建設が1992年より進められている。この装置では荷電数対質量数比 ( $q/A$ ) が1/30以上のイオンを2 keV/uから170 keV/uまで分割同軸型RFQ (SCRFFQ) で加速し、荷電変換部で $q/A$ を1/10以上にした後IHリニアックで1046 keV/uまで加速する [1]。51 MHz IHリニアックの構造は、図1に示すようにシャントインピーダンスを高くするためドリフトチューブ内に収束要素を置かず、タンクを4つに分けタンク間に3台の三連四極電磁石を配置している。これにより高シャントインピーダンスとビームエネルギーの可変を実現している [2]。しかしこの構造ではタンク間のドリフトスペースの長さがビーム軸方向のアクセプタンスを決めることになる。IHリニアックの共振周波数が前段加速器SCRFFQの25.5 MHzの2倍であるため、軸方向のアクセプタンスが小さくなっており、できるだけ大きくするために三連四極電磁石の長さを可能な限り短くしなければならなかった。最終的には図1のように四極電磁石をタンクにくい込ませることにより、

ビーム軌道計算では $200\pi$  keV/u · degの軸方向アクセプタンスが得られた。また横方向のアクセプタンスは、ビーム中心軸から2 cm以内で $2.4\pi$  mm · mradである。ビーム軌道計算より要求された仕様をもとに、2次元磁場解析コードTRIMを用いて設計を行った。さらに電磁石間が近接しているため、3次元磁場解析コードにより電磁石間の磁場の干渉とGL積を調べるとともに、1台の三連四極電磁石を試作しホール素子による磁場測定を行った。

## 2. 三連四極電磁石の設計

三連四極電磁石の中央の四極電磁石の磁極長を15 cm、両側を10 cmと決めるとき、ビーム軌道解析から最大磁場勾配50.6 T/mでビーム中心軸から2 cmまでの一様性が要求されている。そこで2次元磁場解析コードTRIMを用いて外形形状の設計を行った。最終的な外形形状を図2に示す。磁氣的に厳しい条件であるため、鉄心は最上級の純鉄材を使用しボア半径もできるだけ小さくし2 cmと決めた。また鉄心ができるだけ飽和しないようにするためコイル部として幅2.5 cmのスペースを開ける以外は全て磁極部とした。外半径は加速空洞に食い込ませるためできるだけ小さくし17.5 cmとした。磁極先端はシムは付けずに単純な $xy=2$ の双曲線形状である。磁場解析の結果を図3に示す。起磁力9000 ATで中心の磁場勾配が51.4 T/m、 $x=1.9$  cmまで $\pm 0.1\%$ 以内の一様性である。

コイルは電流密度が高いため (最大 $19.6$  A/mm<sup>2</sup>)、冷却水システムを電磁石1台あたり8系統とし安価な既成

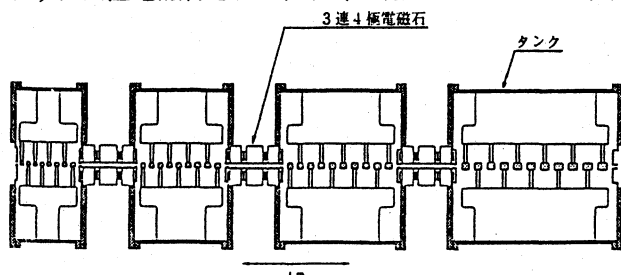


図1. IHリニアックの構造

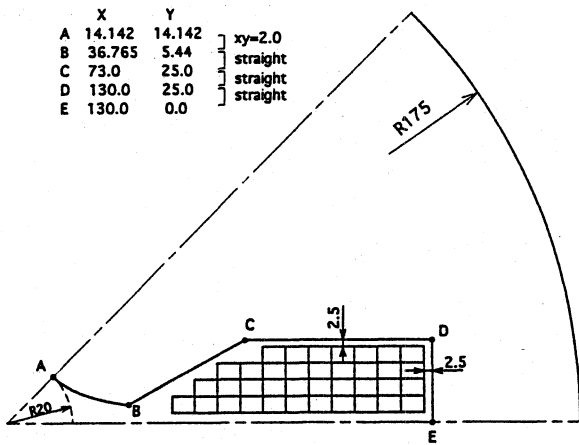


図2. 四極電磁石断面形状 (単位 mm)

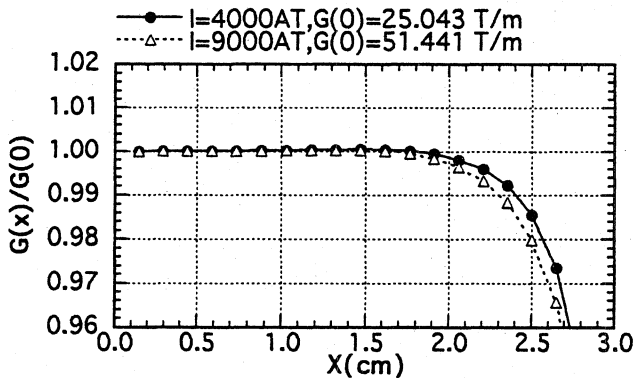


図3. X方向の磁場勾配分布

の35V・300A電源が使用可能なホロコン(外形4×6mm, 流路2×4mm)を選定した。コイルは磁極当たり34ターンである。

### 3. ELF/MAGICを用いた3次元磁場解析

今回の三連四極電磁石は電磁石間が接近しているため電磁石間で磁場の干渉が強いと思われる。また高磁場勾配が必要なため鉄心が飽和した状態で使用する。必要なGL積(磁場勾配×磁極長)が得られるかGL積の一様性は確保できるかは2次元解析では予測不可能である。そこでこの2点を3次元解析コードELF/MAGICによって調べた。当初、磁極長はQL15cm、QS10cmであったがQLとQS間の間隔(5cm)をコイル製作上の問題から1cm長くしたため、磁極長は14cmと9cmに短くした。最大起磁力 $34 \times 300 = 10200$ ATのときの解析結果を図4と5に示す。図4はX軸方向の磁場勾配分布である。座標軸はビーム軸方向をZ軸にとり、ビーム軸に垂直な方向をX、Y軸とした。磁場勾配はQLの中心で48.7T/mであり、2次元解析では9000ATで中心の磁場勾配は51.4T/mであったことを考えると、中心の磁場勾配は大きく落ちていることがわかる。これは磁極長が短く飽和による磁場の漏れも大

きいことが原因と思われる。Z=40mmまではほぼ平坦な分布であるが、Z=60では中心より一旦上昇する傾向が見られZ=80になると極端に中心より減少する分布となる。図5はQL単独とQSを配置したときの比較である。QL単独に比べてQSとの干渉によりGL積は6%減少するが、平坦部は若干延びている。これは図4のZ=80mmの分布からもわかるようにX軸中心近くのほうが磁場のしめだしが多く、QSの磁場と干渉して打ち消し合った結果、中心付近のGL積が減少したためと考えられる。

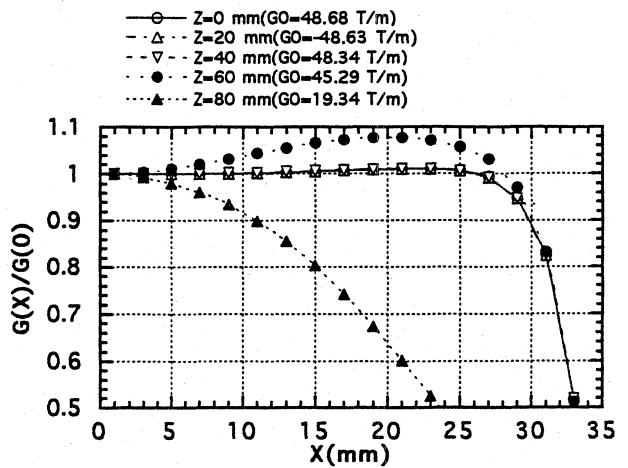


図4. QLのX方向の磁場勾配分布 (QL+QS)

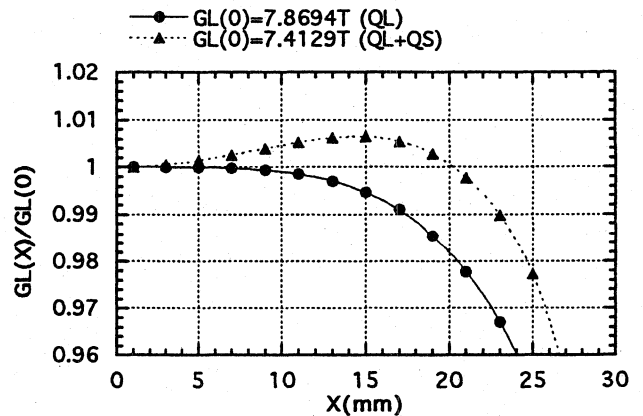


図5. QLのGL積のX方向分布 (QL単独とQLとQSを配置したときの比較)

### 5. 磁場測定

性能を確かめるため三連四極電磁石を1台試作した。その写真を図6に示す。リターンヨークの形状はアライメントをしやすくするため、図2に示した円形から八角形に変更している。ホール素子を3次元ステージに取り付けて水平面内のマッピングによる磁場測定を行った。マッピングのステップはX方向が5mm、Z方向が10mmである。最大励磁(I=300A)のときの磁場勾配の測定結果(QL)を図7に示す。中心部の磁場勾配は47.0T/mであり、磁場解析の結

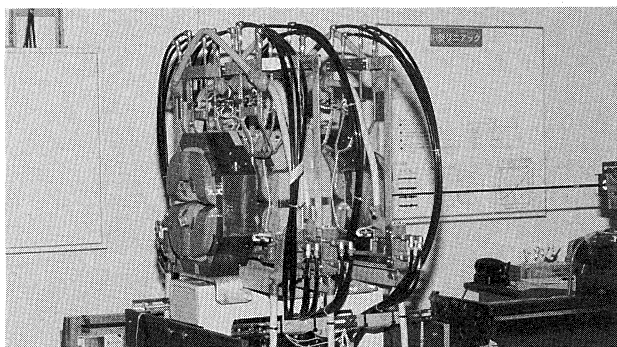


図6. 試作した三連四極電磁石

果48.68 T/mより3.5%低い結果となった。この差は、磁場解析コードELF/MAGICの計算値は実測値よりも3%程度高くなる傾向にあることが、原因と考えられる[3]。X方向の分布形状については、解析と実測の間に図7に示すような違いがある。

GL積の測定結果を図8に示す。測定結果のばらつきは、ステージのがたつきによるホール素子の位置誤差が原因であると推測される。この測定方法では、磁場測定値の差をマッピングのステップ値で割って磁場勾配を求めるため、位置誤差の影響を大きく受ける。ばらつきを平均するとボア中心でのGL積の値は、お

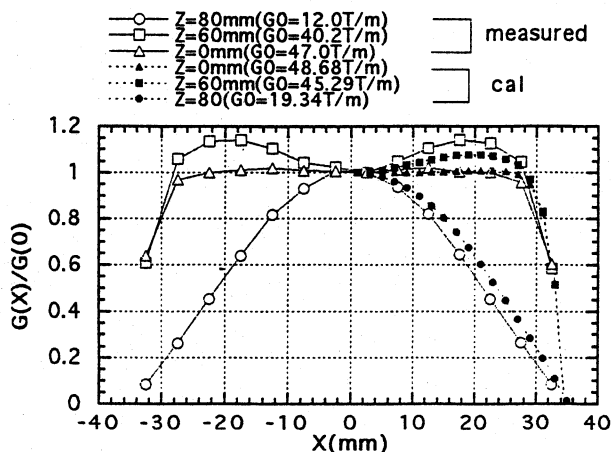


図7. X方向磁場勾配分布の測定結果

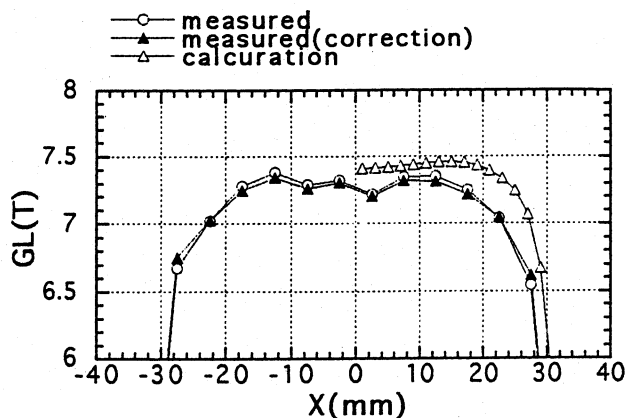


図8. GL積の測定結果及び磁場解析結果

表1. 三連四極電磁石のスペック

|                  |                            | QL      | QS    |
|------------------|----------------------------|---------|-------|
| 磁極長 (mm)         |                            | 140     | 90    |
| 最大磁場勾配 (T/m)     |                            | 47      | 44.3  |
| ボア直径 (mm)        |                            | 40      | ←     |
| 最大起磁力 (A T/pole) |                            | 10200   | ←     |
| コイル巻数 (ターン/pole) |                            | 34      | ←     |
| ホロコ寸法 (mm)       |                            | 4×6-2×4 | ←     |
| 最大電圧 (V)         |                            | 28      | 24    |
| 最大電流 (A)         |                            | 300     | ←     |
| 最大電力 (kW)        |                            | 8.4     | 7.2   |
| 冷却水              | 流量 (ℓ/min/magnet)          | 9.3     | 10.8  |
|                  | 圧力損失 (kg/cm <sup>2</sup> ) | 4.0     | ←     |
|                  | 水温上昇 (℃)                   | 15~17   | 10~18 |
|                  | 水路数 (/magnet)              | 8       | ←     |

よそ7.3 Tである。ボア半径(X=20 mm)までの磁場勾配の一様性は、磁場解析の結果よりも悪くΔG/G=±1.7%である。

また試作した四極電磁石のスペックを表1に示す。冷却水温度上昇については測定値がばらついたため、その範囲で示している。

4. まとめ

IHリニアック用の高磁場勾配の三連四極電磁石を開発した。電磁石間が近接しているため、3次元磁場解析コードを用いて磁場の干渉の影響を調べた。個々の電磁石のGL積は単体のときに比べて下がるけれども、鉄心の磁気飽和によるGL積の横方向の一様性の劣化は、磁場の干渉効果により改善される方向に作用することがわかった。電流密度が高いため電磁石1台あたり冷却水の系統を8とし、ホロコンは使用電源を考えて最適なものを選択した。1台を試作しホール素子による磁場測定を行った結果、得られたGL積はほぼ要求を満足し実際に使用可能なことを確認した。

参考文献

- 1) S.Arai et al, Proceedings of the 9th Symposium on Accelerator Science and Technology, August 25-27, 1993, p.226
- 2) M.Tomizawa et al, Proceedings of the Particle Accelerator Conference, May 17-20, 1993, Washington, D.C.
- 3) 電気学会研究会資料 S A - 8 7 - 1 8