

## LEBT for a Proton Linear Accelerator for Compact Neutron Source

Shotaro Ushijima, Hiromu Tongu, Hiroshi Fujisawa, Masahiro Ichikawa, Masako Yamada, Yoshihisa Iwashita

ICR, Kyoto University  
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

### Abstract

A compact neutron source using Li(p,n) or Be(p,n) reaction is proposed. The system consists of ECR ion source, LEBT(Low Energy Transport), RFQ linac and post accelerator. We suppose energy of the proton beam is 3MeV and peak current is 40 mA operated at the repetition frequency of 25Hz with the pulse width of 1ms. Solenoid coils can transport the large current beam in LEBT. To reduce energy consumption in LEBT we try to design a hybrid magnet that consists of solenoid coils and permanent magnet. This paper describes the design of the hybrid electromagnet and the beam matching based on its magnetic field simulation.

### 小型中性子源用陽子線型加速器のLEBT

#### 1. はじめに

京都大学理学部物理学教室では小型の中性子源として陽子線型加速器を用いてp-Liもしくはp-Be反応を起こして中性子を発生させるシステムの構築が計画されている。陽子の加速エネルギーは3MeVを想定して、ECRイオン源、LEBT(Low Energy Transport)、RFQ、後段加速管という構成であり、加速ビームはピーク電流40mA、繰り返し25Hz、パルス幅1msである。システムとしては、ECRイオン源はフィラメントを持たないため、長寿命が期待できる。また、加速効率を上げるため、750keV RFQと後段加速管に分けている。

このうち、LEBTは大電流を扱えるようにソレノイドコイルを採用する。このLEBTのソレノイドでの消費電力は発熱や運転コストの抑制のために小さいほうが望ましい。そこで、LEBTソレノイドの消費電力を低減させるべく、永久磁石とのハイブリッド電磁石の設計を試みた。ここではシミュレーションソフトPANDIRAとTRACE3Dを用いて、ハイブリッド電磁石の設計とその発生磁場でのビームシミュレーションに基づくビームマッチングを行った。

#### 2. ソレノイドコイル

ビームマッチングを行うにあたって、この系では少なくとも2つのパラメータがマッチングに必要である。したがってデュアルソレノイドを採用した。またイオン源から入射時の陽子ビームのエネルギーが25keV程度の低速で目標とするピークカレントが40mAと大きいため、空間電荷効果によるビームサイズの増大を考慮する必要がある。このため、ソレノイドコイルの内径は80mmと大きくとっている。

今回の設計ではこのソレノイドコイルのリターンヨークのギャップに図1で示すような永久磁石を導入したハイブリッド電磁石を用いることで、中心軸上での磁場強度を増加させることができる。図2は磁場シミュレーションソフトPANDIRA<sup>[1]</sup>を用いて発

生磁場を計算し、中心軸上での磁場の軸方向成分をプロットしたものである。ソレノイドの電流値は表2に示す。

ソレノイドコイルの集束力はおおむね $[Bz^2/dz]$ に比例する。これを計算すると表3のようになる。この表から分かるとおり概ね20~50%程度の性能向上が期待される。磁場が強くなるにつれて効果が減少しているが、消費電力は電流値の二乗に比例することを鑑みれば高磁場域での2割の性能向上は有意義である。

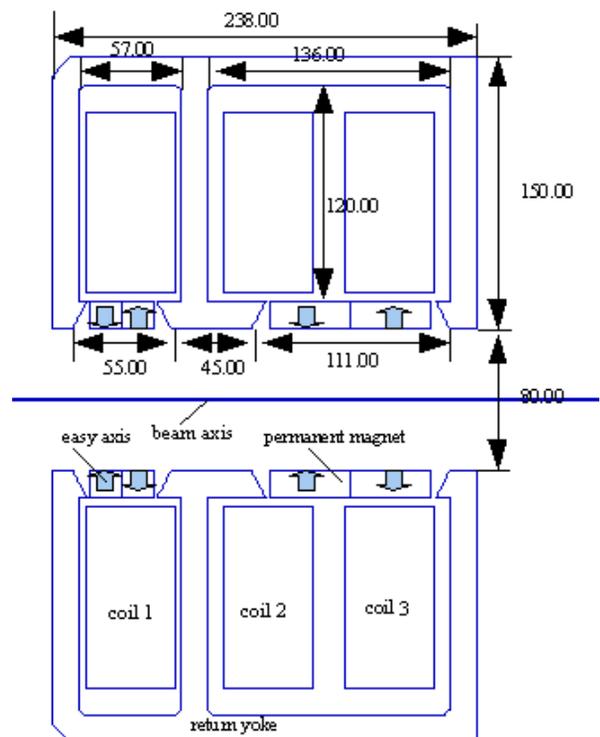


図1：ソレノイドコイルの断面図

表 1 : 永久磁石のパラメータ

HCEPT	-12900
BCEPT	13600

表 2 : ソレノイドコイルの電流値

	各コイルの電流値 [kA]		
	coil 1	coil 2	coil 3
Set1	12.00	14.00	14.00
Set2	15.00	17.50	17.50
Set3	20.00	20.00	20.00
Set4	22.50	23.75	23.75

表 3 : 集束能力の比較

	$Bz^2 dz [G^2 \cdot mm]$		
	永久磁石なし	永久磁石あり	
set1	1.05E+09	1.59E+09	1.52
set2	1.63E+09	2.25E+09	1.38
set3	2.29E+09	3.00E+09	1.29
set4	3.11E+09	3.85E+09	1.24

### 3. ビームマッチング

#### 3.1 TRACE-3Dをもちいたシミュレーション

ビームマッチングはLEBTソレノイドが図3のような配置にあるとして、シミュレーションソフトTRACE-3D<sup>[2]</sup>を用いて行った。イオン源からの入射する時、またRFQへ入射する時のパラメータは表4のような値を用いた。また、位置関係等は表5のようにして行った。ビームカレントは40mAとした。

マッチングの結果、必要な磁場強度は表5ようになった。また、図4はLEBT中でのビームサイズの変化である。LEBTの内径は80mmで、最大ビームサイズは46mm程度であるから、この設計でビームのトランスポートには十分であることが分かる。

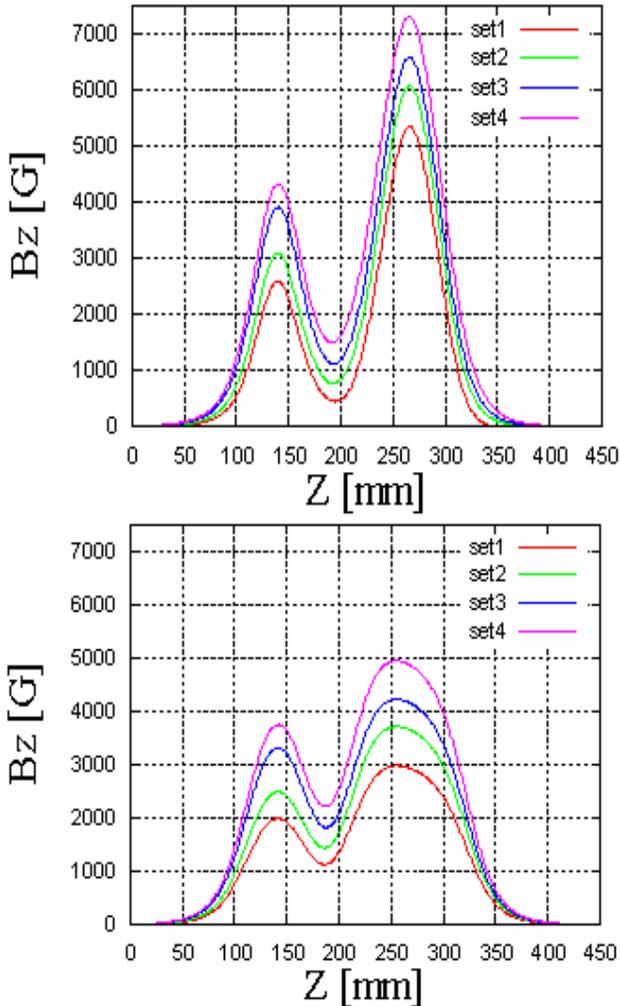


図 2 : 電流の変化と中心軸上の磁場の軸方向成分  
永久磁石あり (上) と永久磁石なし (下)

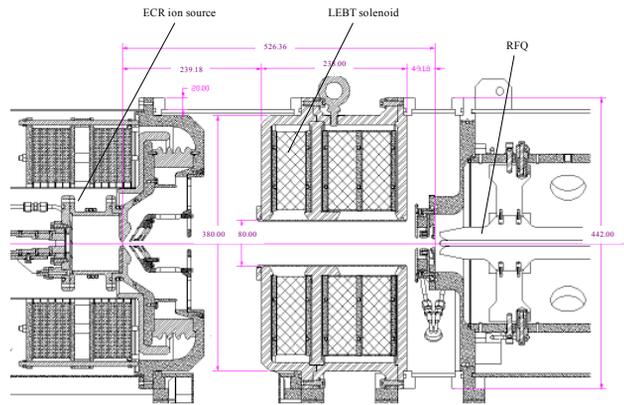


図 3 : LEBTソレノイドコイルの配置図

表 4 : LEBT両端でのtwiss parameterと emittance

	イオン源開口 部から150mm	RFQ入射 位置
alpha	-3.93	3.23
beta [mm/mrad]	0.64	0.079
emittance [ $\pi$ -mm-mrad]	150	150

表4：各エレメントのパラメータ

エレメントの距離 [mm]	
イオン源－ソレノイド1間ドリフト	101.18
ソレノイド1	55.00
ソレノイド1－ソレノイド2間ドリフト	45.00
ソレノイド2	111.00
ソレノイド2－RFQ間ドリフト	64.18

表5：TRACE-3Dによるマッチングの結果

ソレノイド磁場強度 [G]	
ソレノイド1	4051
ソレノイド2	4397

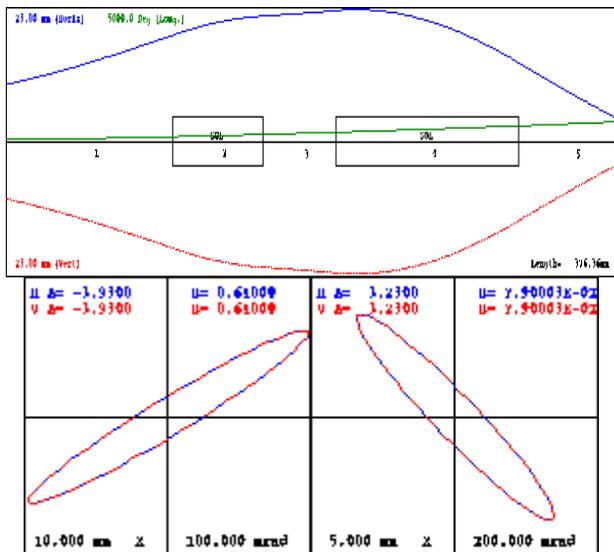


図4：TRACE3Dによるビームシミュレーション  
各エレメントとビームサイズの変化（上）入射プロファイル（左下）マッチ後プロファイル（右下）

### 3.2 PANDIRAをもちいたシミュレーション

3.1で要求された磁場と等価な磁場を、永久磁石ありの場合となしの場合でPANDIRAを用いて電流値をパラメータとして計算した。この時の磁場分布を図5に、電流値を表6に示す。

表6：マッチング時のソレノイドコイルの電流値

	各コイルの電流値 [kA]		
	coil 1	coil 2	coil 3
永久磁石あり	23.750	19.125	19.125
永久磁石なし	24.250	22.750	22.750

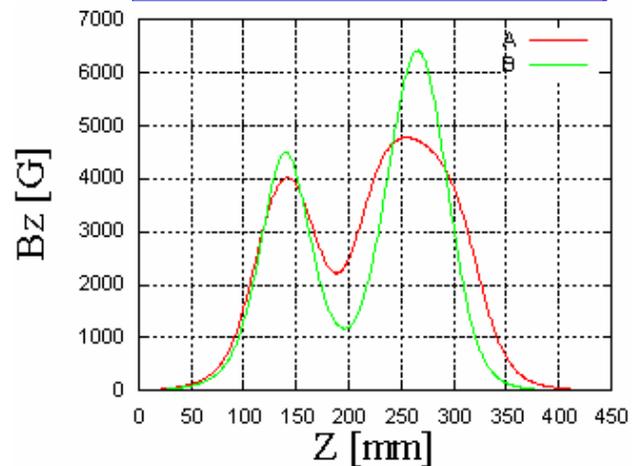
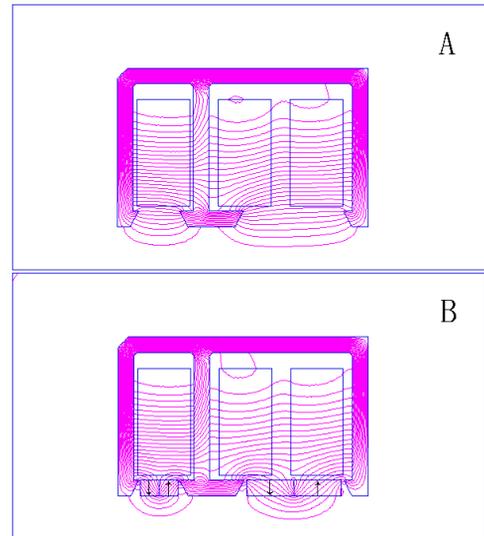


図5：マッチング時の磁場分布（上半分のみ）  
永久磁石なし（A）と永久磁石あり（B）の場合

## 4. まとめと今後の展望

今回得られたシミュレーション結果から、このハイブリッド電磁石を導入することで消費電力を20%程度低減できることが期待される。

今回のシミュレーションでは空間電荷効果等の取り扱いは簡素にし、また電磁石のギャップの位置や大きさ、アパーチャーなどを固定して行った。

今後はさらに、それらのパラメータの見直しや、それに伴う永久磁石の配置を含めさらに光学的特性が良くなるよう検討する。また、PANDIRAによって得られた磁場分布を使ったシミュレーションを行い、空間電荷効果やその中性化も含めて最適なデザインを探索し、実際の導入に耐えうる設計を行う予定である。

## 参考文献

- [1] "User's Guide for the POISSON/SUPERFISH group of codes", LA-UR-96-1834, LANL (2006)
- [2] K. R. Crandall and D. P. Rusthoi, "TRACE-3D Documentation", LA-UR-97-886, LANL (1997)
- [3] Linac Systems, private communication.