

## 解 説

## Warm Snake 電磁石の開発および偏極陽子ビームの加速

高野 淳平\*

## Development of the Warm Snake and Acceleration of Polarized Protons

Junpei TAKANO\*

## Abstract

Acceleration of polarized protons is one of interesting issues of the high energy and accelerator physics. As known as the proton spin crisis, the total of the quark spin is not equal to the proton spin. To explore sources of the proton spin, it has been required to accelerate polarized protons to higher energy as hundreds GeV with higher polarization. However it is difficult to accelerate the polarized protons to higher energy with preserving higher polarization by using circular accelerators since the polarized beam crosses several types of depolarizing resonances. To overcome the depolarizing resonances, unique components are employed to the accelerator chain at the Brookhaven National Laboratory (BNL). On this description, developing a normal conducting helical dipole partial Siberian snake is explained in detail. As the results of upgrading the accelerators, the polarization has been increased recently.

陽子のスピンは当初2個のアップクォークと1個のダウンクォークの和であると考えられていた。しかしながら、1980年代後半にCERNで行われた偏極ミュオンビームの深非弾性散乱実験によってクォークスピンの陽子スピンへの寄与は12%程度であることが

示された<sup>1-3)</sup>。この結果は「陽子スピン危機」として知られている。この問題を解決するため、米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)において、図1に示されている加速器施設を用いた偏極陽子ビームの加速・衝突実験が行われている<sup>4)</sup>。この実験は偏極した(ス

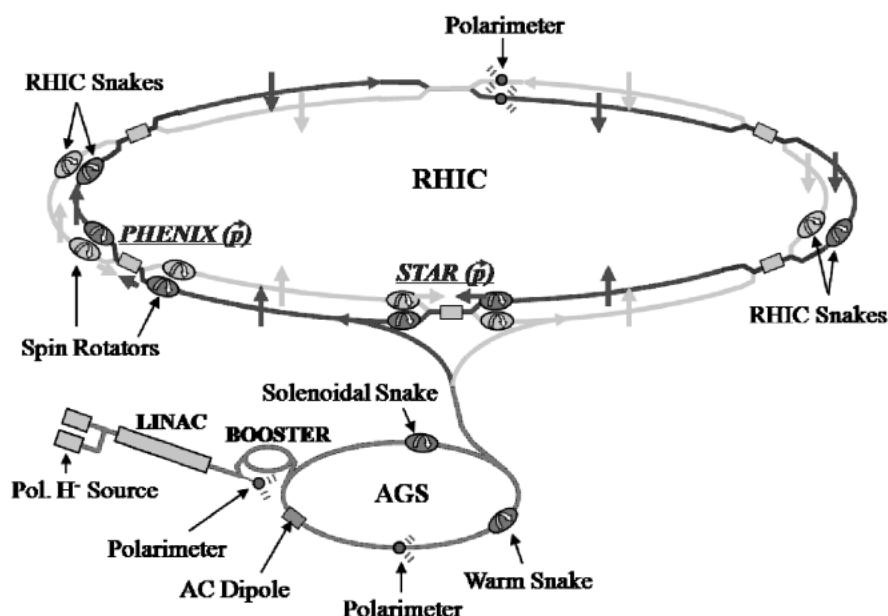


図1 BNL 加速器の全体図。減偏極共鳴を避けるため Siberian Snake 電磁石と AC ダイポール電磁石が導入されている。また、偏極度を測定するため、偏極度計が設置されている。

\* 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設/KEK, Accelerator Laboratory  
(E-mail : junpei.takano@j-parc.jp)

ピンの向きを揃えた) 陽子ビームを 100 GeV まで加速し、互いに衝突させることで陽子内部のスピンの構造を調べることを目的としている。クォークスピン以外の陽子スピンの起源の候補としてグルーオンのスピンと陽子の軌道角運動量が挙げられており、それぞれの陽子スピンへの寄与の割合を高精度で実験的に解析するため、より高い偏極度を持つ陽子ビームが必要となる。しかしながら、円形加速器を用いて偏極陽子ビームを高エネルギーまで加速する場合、様々な減偏極共鳴が生じてしまう。BNL では特に Alternating Gradient Synchrotron (AGS) 加速器における減偏極が著しく、偏極度のボトルネックになっている<sup>5)</sup>。本論文では理化学研究所と東京工業大学が共同開発した常電導ヘリカルダイポール型 Partial Siberian Snake (Warm Snake, WSNK)<sup>6)</sup>の開発を中心に AGS 加速器のアップグレードについて述べる。

## 1. シンクロトロンと減偏極共鳴

シンクロトロン内における減偏極共鳴は粒子のスピンのシンクロトロンを構成する電磁石の相互作用によって生じる。陽子のスピンベクトルは図 2 に示されているようにシンクロトロン内を歳差運動している。

スピンを持つ粒子が円形加速器を 1 周する間にスピンベクトルが歳差運動する回数は  $G\gamma$  回であり、スピンチューン  $\nu_{sp}$  と定義する。ここで陽子の磁気回転比  $G$  は

$$G = \frac{g-2}{2} \quad (1)$$

であり、陽子の場合、変則的  $g$  因子は 5.59 であることから、 $G=1.79$  となる。 $\gamma$  はローレンツ因子である。

完全に垂直磁場のみで構成される理想的な円形加速器においては、偏極陽子ビームのすべてのスピンベク

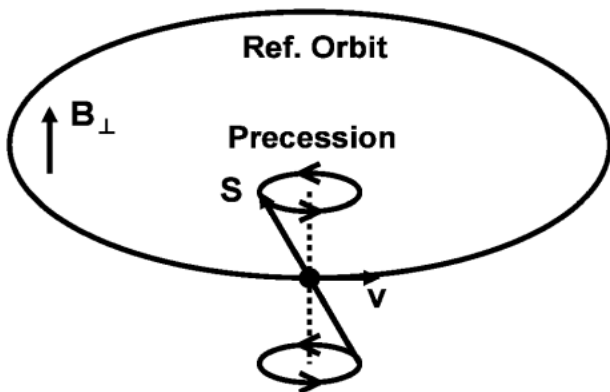


図 2 加速器内におけるスピンベクトルの歳差運動

トルが同じ方向に歳差運動するため減偏極は起きない。しかしながら、実際のシンクロトロン加速器では四重極電磁石による磁場、ダイポール電磁石の不整磁場およびミスアライメントによって垂直成分以外の磁場が存在する。そのため以下の減偏極共鳴が生じる。

### 1.1 Imperfection resonance

偏極陽子をシンクロトロンで加速する間、スピンベクトルの歳差運動が整数倍になるエネルギー条件が多く存在する。このとき加速器内のある点に磁場のエラーがあると、スピンベクトルは每周同じ磁場のエラーを受けてしまうため、偏極度が落ちてしまう。この減偏極共鳴を Imperfection resonance と呼び、発生条件は

$$\nu_{sp} = G\gamma = n \quad (n \text{ は整数}) \quad (2)$$

と表される。

### 1.2 Vertical intrinsic resonance

強収束シンクロトロンでは四重極電磁石を用いてビームを水平および垂直方向に収束し、ビームの発散を防ぎながら加速しているが、このうち垂直方向の収束力は四重極電磁石の水平方向の磁場によって行われている。この水平磁場と垂直方向のベータトロン振動の相互作用によって減偏極共鳴が生じる。これを Vertical intrinsic resonance と呼び、発生条件は

$$\nu_{sp} = G\gamma = mP \pm \nu_y \quad (m \text{ は整数}) \quad (3)$$

と表される。ここで、 $P$  はシンクロトロンを構成する電磁石群の数、 $\nu_y$  は垂直方向のベータトロンチューンである。

## 2. AGS 加速器

AGS 加速器は周長 807.09 m で、セクション A~L の 12 個の電磁石群で構成されている。各電磁石群には 20 個のダイポールがあり、5 個の FODO セルがある。各メインダイポールの後ろにはストレートセクションがあり、偏極陽子ビームの偏極度の維持および偏極度の測定を行うコンポーネントが導入されている。

図 3 に 2004 年時点における AGS 加速器の構成を示す。

AGS 加速器における  $G\gamma$  のレンジは 4.5~46.5 であるため、42 個の Imperfection resonance が存在する。また、垂直方向のベータトロンチューンは 8.70 であるため、Vertical intrinsic resonance は

$$\nu_{sp} = G\gamma = 12m \pm 8.7 \quad (m \text{ は整数}) \quad (4)$$

となる。したがって、AGS 加速器内では

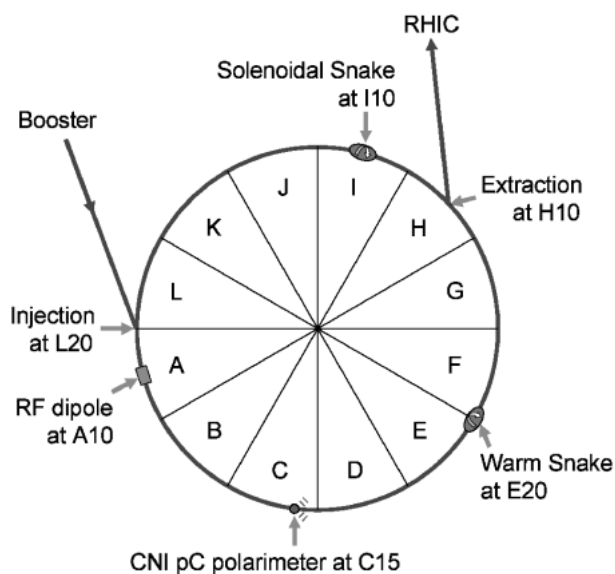


図3 2004年のAGS加速器の構成

$$\begin{aligned} \nu_{sp} = G\gamma &= 0 + \nu_y, 24 - \nu_y, 12 + \nu_y, 36 - \nu_y, \\ &24 + \nu_y, 48 - \nu_y, 36 + \nu_y \\ &= 8.7, 15.3, 20.7, 27.3, 32.7, 39.3, 44.7 \end{aligned}$$

の7点において減偏極共鳴が発生する。AGS 加速器ではこれらの減偏極共鳴を乗り越えるため、以下の機器が導入されている。

### 2.1 Solenoidal Snake

AGS 加速器におけるすべての Imperfection resonance を乗り越えるために1994年に開発・導入された電磁石が Solenoidal Partial Siberian Snake (Solenoidal Snake, SSNK)<sup>7)</sup>である。

Siberian Snake 電磁石は加速器リング全体から見てもビーム軌道に対してはドリフトスペースと同じ要素であるが、スピンのみを意図的に傾ける電磁石である。Siberian Snake はスピンの傾ける強さによって Full Snake と Partial Snake に分類される。Full Snake はスピンを180°傾けることが可能なものであり、Partial Snake はスピンを傾ける能力が180°未満のものである。式(5)にスピントーンとスネーク強度の関係式を示す。

$$\nu_{sp} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \cos \left( \frac{\delta}{2} \right) \cos (\pi G\gamma) \right\} \quad (5)$$

ここで、 $\delta$  はスネーク電磁石による偏極の傾き（スネーク強度）である。

Imperfection resonance を避けるためには  $G\gamma =$  整数のビームエネルギーにおいてスピンの歳差運動の回数が非整数であれば良いので、弱い Partial

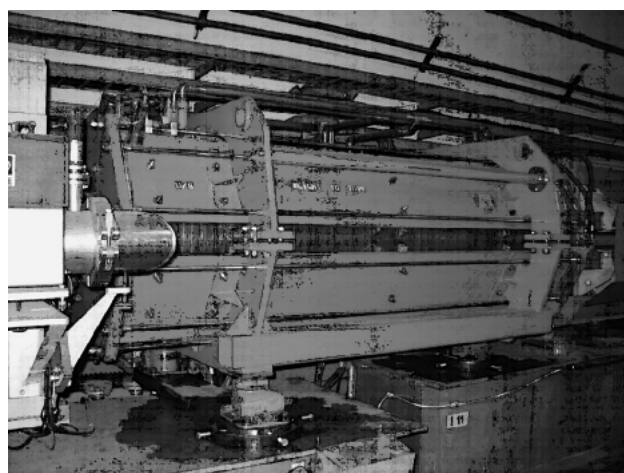


図4 Solenoidal Snake

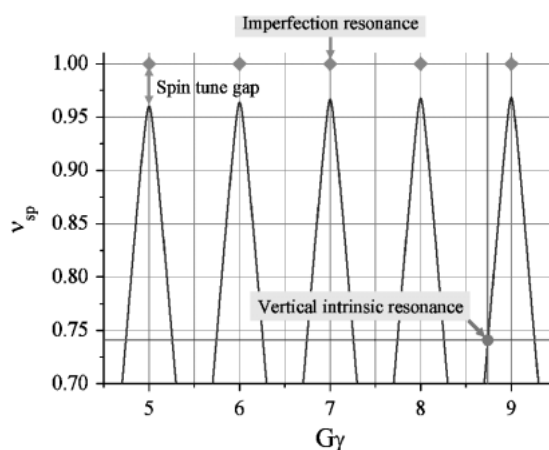


図5 スピントーンと減偏極共鳴

Solenoidal Snake で十分である。Solenoidal Snake はスピンのベクトルを9°だけ傾ける能力を持つ。180°に対する9°は5%であるため、5% Solenoidal Snake とも呼ばれる。図5は Solenoidal Snake 稼動時のスピントーンと減偏極共鳴の関係を示すグラフである。

このように、Solenoidal Snake を稼動することでスピントーンギャップを開けることができ、 $\nu_{sp} = G\gamma =$  整数の Imperfection resonance の発生条件をすべて避けることができる。しかしながら、Solenoidal Snake だけでは Vertical intrinsic resonance を避けることができない。そこで、次に示す AC dipole が AGS 加速器に導入された。

### 2.2 AC dipole

当初、AGS 加速器では Vertical intrinsic resonance を避けるために急激にベータトロンチューンを変化させる高速チューンジャンプ法が用いられていた。しかしながら、この方法ではビームエミッタンスの増大を

避けることができない。AGS 加速器はその後段にあたる Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) 加速器のための入射加速器として可能な限り小さいビームエミッタンスを実現する必要がある。そこで 1997 年に開発・導入されたコンポーネントが AC dipole<sup>8)</sup>である。図 6 に AC dipole の写真、図 7 に AC dipole ON/OFF 時の偏極の変化のシミュレーション結果を示す。

AC dipole は Vertical intrinsic resonance の起きるビームエネルギーにおいてビームに対し交流磁場を与え、共鳴点におけるスピンドリフリップを積極的に行うことで高い偏極度を維持したまま Vertical intrinsic resonance を乗り越えることを可能にした。しかしながら、AC dipole は Vertical intrinsic resonance のうち強い共鳴点にのみ有効であるため、Vertical intrinsic resonance のうち  $G\gamma=0+v_y, 12+v_y, 36-v_y, 36+v_y$  においてのみ稼動している。残りの弱い Vertical intrinsic resonance はこの時点では対策を講じていな

い。

以上の Solenoidal Snake と AC dipole を用いて AGS 加速器の調整を行った結果、2003 年には AGS 加速器出射エネルギーにおいて 40% の偏極度を達成した。

### 3. Warm Snake

AGS 加速器内のすべての Imperfection resonance を避けるために導入した Solenoidal Snake であるが、その磁場によってビームの水平および垂直のベータatron 振動がカップリングを引き起こしていた。そのため、Intrinsic resonance に関して垂直方向のベータatron チューンだけでなく、水平方向のベータatron チューン (AGS 加速器では  $\nu_x=8.85$ ) も考慮する必要があった。これを Transverse coupling resonance と呼び、発生条件は

$$\nu_{sp} = G\gamma = mP \pm \nu_x = 12m \pm 8.85 \quad (m \text{ は整数}) \quad (6)$$

である。この Transverse coupling resonance の影響を減らすため、新たにビーム進行方向に対し垂直な磁場を持つ Partial Siberian Snake が必要であった。図 8 は完成後 AGS 加速器に導入された Warm Snake の写真である。

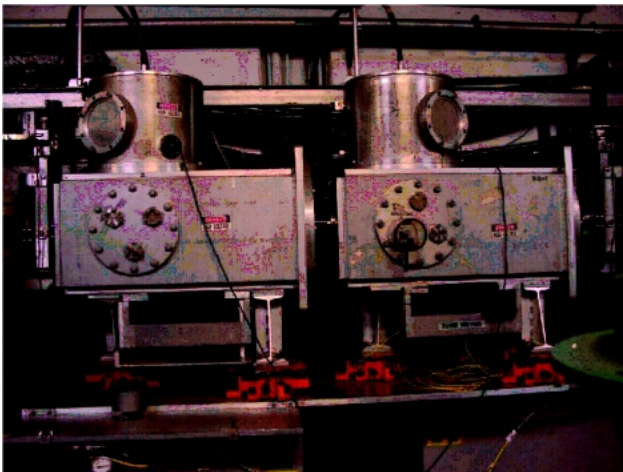


図 6 AC dipole

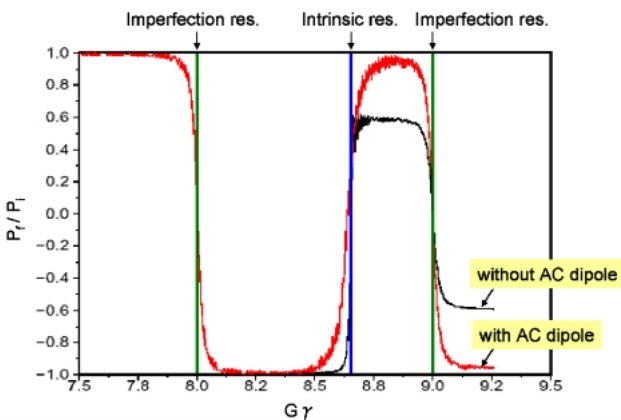


図 7 AC dipole ON/OFF 時の偏極の振る舞い

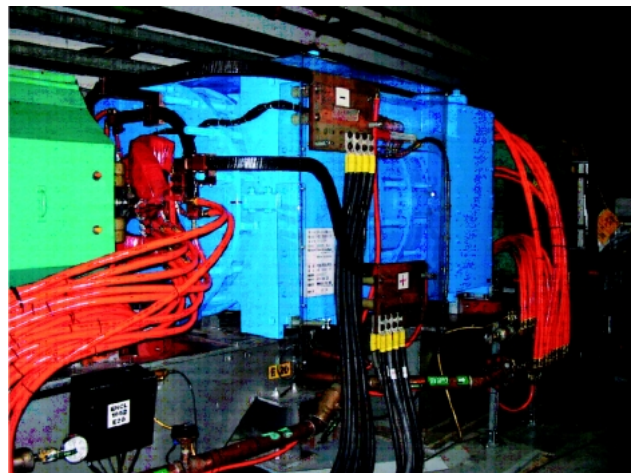


図 8 AGS 加速器内に設置された Warm Snake

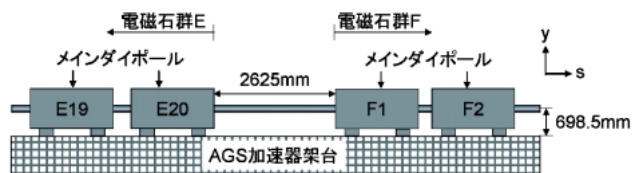


図 9 AGS 加速器内のストレートセクション

表 1 設計条件と最終仕様の比較

	設計条件	最終仕様
最大中心磁場 T	1.5	1.5
電流 A	3000	2670
電圧 V	300	230.9
電力 kW	900	616.5
温度上昇幅°C	17	15.3
重量 kg	18000	14600

### 3.1 全体設計

AGS 加速器の各電磁石群の間には全長 2625 mm のストレートセクションがある。Warm Snake は E20 と F1 のメインダイポール間のストレートセクションに設置された。

ここで、Warm Snake の設計条件と最終仕様の比較を表 1 に示す。

これらの設計条件は AGS 加速器のクレーン重量制限や水圧および既存の電源の仕様を元に決定した。

Warm Snake の磁場強度は Solenoidal Snake のスネーク強度と同程度にするため 1.5 T とした。磁極間隙はビームパイプの直径を考慮して 150 mm とした。このとき必要な起磁力は  $187000 \text{ A} \cdot \text{Turn}$  となる。3000 A でこの起磁力を得るにはコイルの巻数を 63 Turn 以上にする必要がある。Warm Snake ではヘリカルコイルの巻数を  $10 \text{ Turn} \times 7 \text{ Layer}$  の合計 70 Turn とし、運転電流を 2670 A とした。

### 3.2 冷却方式

一般に常電導コイルの冷却方式として自然空冷、強制空冷、間接水冷、直接水冷があるが、Warm Snake は運転電流が高く、1 コイルの全長が 54.8 m と長いことから抵抗による発熱が大きくなるため直接水冷方式を採用した。温度上昇幅を仕様内に合わせるため、いくつかのホローコンダクターの断面サイズおよび形状の規格について熱計算を行った。しかしながら、すべての規格において仕様を満たすものはなかった。そこで、図 10 のように 2 本のホローコンダクターを同時に巻く平行ワインディング法を考案した。

平行ワインディング法によって 1 コイルの全長を半分にし、水路数を二倍にすることで温度上昇を仕様制限内に抑えることが可能となった。

### 3.3 ヘリカルコイルと鉄芯の構造

電磁石の形状には一般的に H 型、C 型、Window Frame (WF) 型がある。今回 H 型と WF 型についてヘリカルコイルと鉄芯の形状の検討を行った。図

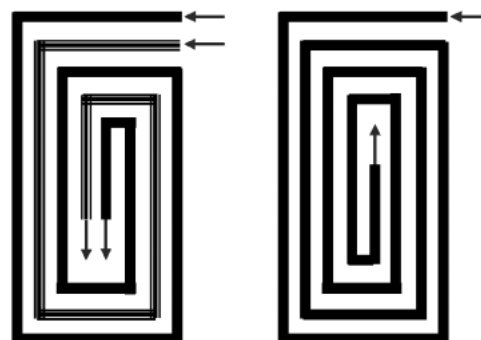


図10 平行ワインディング法 (左) とシングルワインディング法 (右)

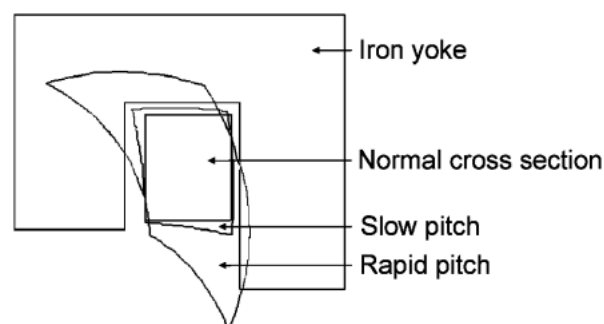


図11 H型ヘリカルコイルの変形

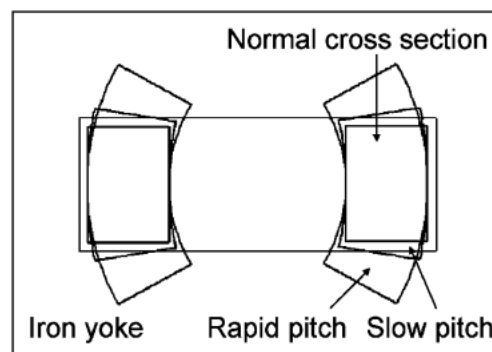


図12 WF型ヘリカルコイルの変形

11 および図 12 は H 型と WF 型のヘリカルコイルの断面形状の変化について螺旋ピッチを変えて計算した結果である。

H 型では螺旋ピッチが急になるとヘリカルコイル断面の変形が非常に大きくなってしまい、鉄芯内の磁場回路を塞いでしまう。WF 型ヘリカルコイルに関しても断面の変形があるものの H 型に比べて小さい。また、WF 型の方が H 型よりも不整磁場を少なく抑えることができることから Warm Snake では WF 型の形状で設計・製作することにした。次節で詳しく述

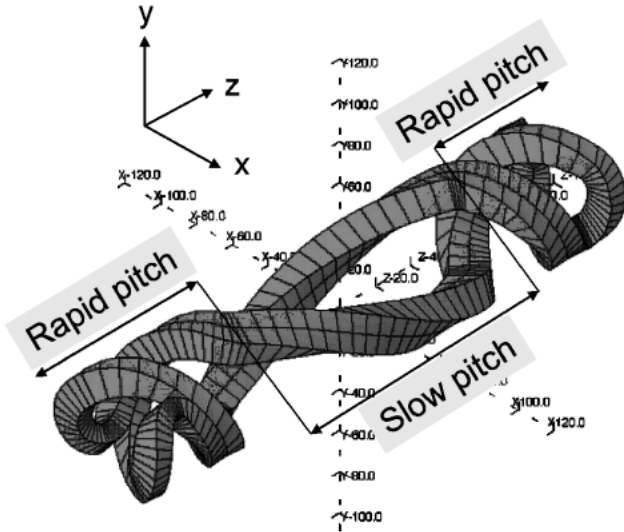


図13 Warm Snake 用ヘリカルコイルの三次元モデル

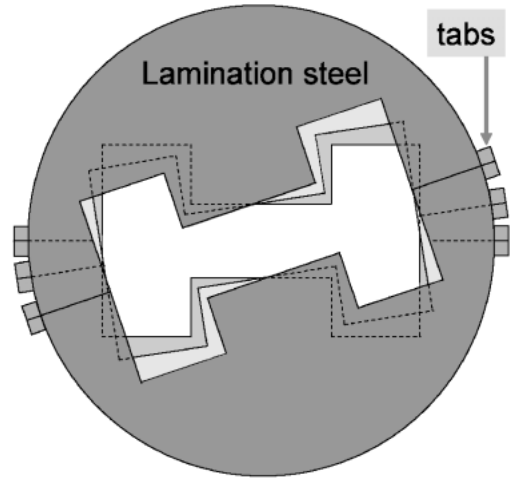


図15 ケイ素鋼板の積み上げ構想図

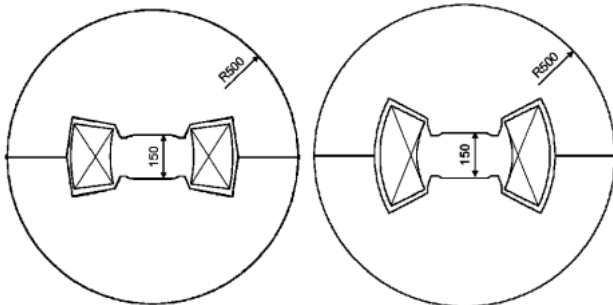


図14 Warm Snake の鉄芯断面形状  
(左：Slow pitch, 右：Rapid pitch)

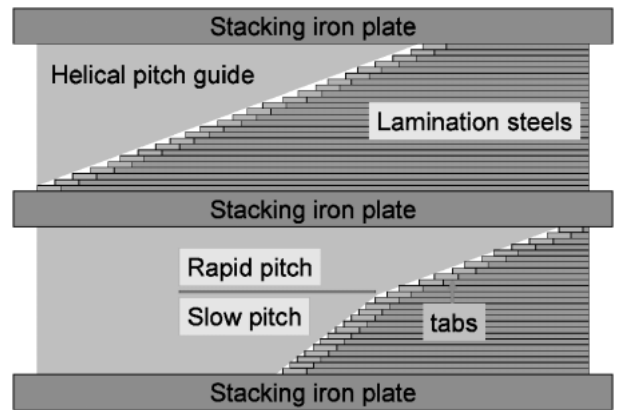


図16 鉄芯の組み立て構想図

べるが、Warm Snake はヘリカルダイポール内のビーム軌道を最適化するため、一体の電磁石で二つの螺旋ピッチを持つダブルピッチ構造になっている。図13に Warm Snake 用ヘリカルコイルの三次元磁場計算用モデル図を示す。

このヘリカルコイル断面の変形に合わせた Warm Snake 用の鉄芯断面形状を図14に示す。

ヘリカルダイポール型電磁石の場合、コイルは WF 型を元に設計しても、その断面形状の変形によって、鉄芯は H 型のようにポールピースをもつ形状になる。このように Warm Snake は WF 型と H 型の両方の特徴を併せ持つ構造になっており、これはヘリカルダイポール型電磁石固有の特徴である。その鉄芯の断面形状から新たに M 型電磁石と命名した。

Warm Snake の鉄芯は螺旋構造を持つため、厚さ 0.5 mm のケイ素鋼板と 8 枚の厚さ 30 mm のケイ素鋼板固定用鉄板の角度を変えながら積み重ねることにした。図15および図16は鉄芯の組み立て構想図であ

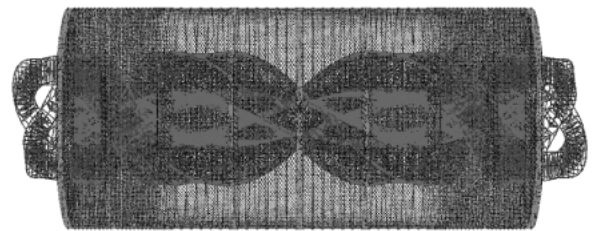


図17 Warm Snake の三次元磁場計算のモデル

る。

図16に示したように、ケイ素鋼板の外側にはあらかじめ突起のある設計となっており、この突起部分を図17に示したようにステンレス製のヘリカルピッチガイドに沿わせることで正確なヘリカルダイポール構造およびダブルピッチ構造を実現することができる。

### 3.4 三次元磁場計算

Warm Snake の三次元磁場計算は OPERA-3D / TOSCA<sup>9)</sup>を用いて行った。このときケイ素鋼板の積

層率を 98% として計算を行った。図 17 に三次元磁場計算のモデルを示す。

AGS 加速器全体のビーム軌道に対する影響を抑えるため、Warm Snake の出入口におけるビームのオフセットおよび出射角度を持たせないために以下の条件を満たす必要がある。

$$\theta_z = \int B_y ds = 0 \quad (7)$$

$$\theta_y = \int B_x ds = 0 \quad (8)$$

$$\Delta_x = \int \theta_z ds = 0 \quad (9)$$

$$\Delta_y = \int \theta_y ds = 0 \quad (10)$$

$\theta_x, \theta_y$  は水平・垂直方向の出射角度、 $\Delta_x, \Delta_y$  は出射点における水平・垂直方向のビーム位置のオフセットである。これらの式から、水平および垂直方向の積分磁場がゼロであれば、出射角度および位置のオフセットをゼロにすることが可能であることがわかる。限られたスペースでこの条件を満たすために考案された構造がダブルピッチ構造である。ここで取り得るパラメータを以下に示す。

- 鉄芯の全長
- Rapid pitch 領域の長さ
- Rapid pitch 領域のヘリカルピッチ
- Slow pitch 領域の長さ
- Slow pitch 領域のヘリカルピッチ

これらの変数のうち a. 鉄芯の全長を 2100 mm, c. Rapid pitch 領域のヘリカルピッチを 0.4 degree/mm と固定し, d. と e. の Slow pitch 領域の長さとおヘリカルピッチの 2 つの変数を用いて Warm Snake 内の磁場の最適化を行った。その結果, Slow pitch 領域の長さは 1320 mm, ヘリカルピッチは 0.196 degree/mm, Rapid pitch 領域の長さはそれぞれ 390 mm となった。図 18 に最適化された Warm Snake 内の Longitudinal 方向の磁場分布を, 図 19 に陽子の螺旋軌道を示す。

以上の三次元磁場計算の結果を用いて Warm Snake 完成後に行った磁場測定の結果との比較を行い, 最終的な磁場の補正を行った。

### 3.5 Warm Snake の製作

螺旋形状のコイルを巻くため, Longitudinal 軸を中心に回転するパイプと全体を回転させるターンテーブルを用いて巻線を行った。図 20 は巻線完了時のヘリカルコイルである。

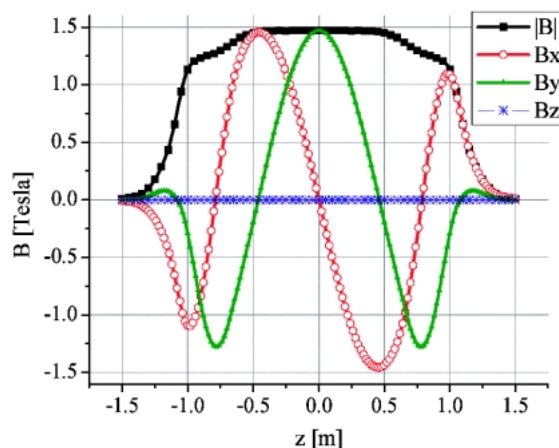


図 18 最適化された Warm Snake 内の磁場分布

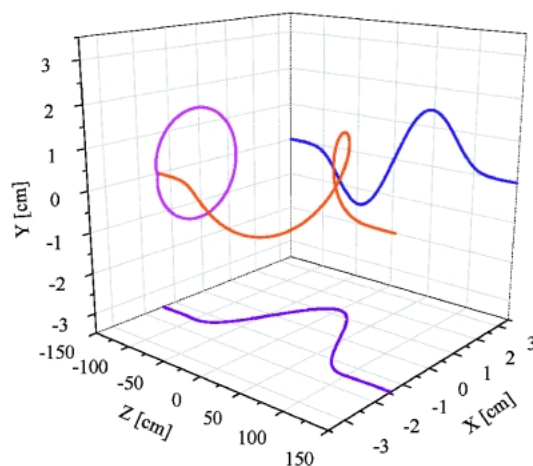


図 19 Warm Snake 内における陽子の螺旋軌道



図 20 巻線完了時のヘリカルコイル

ヘリカルコイルはエポキシ樹脂でキュアした後, 図 21 のように垂直に立て, 固定用鉄板でヘリカルコイルを固定した。ケイ素鋼板の積み上げ作業の製作誤差を電磁石両端に均等に配分するため, 先に上半分のケイ素鋼板を挿入し, その後, 上下反転させ, 残りの半分にケイ素鋼板を挿入した。

各固定用鉄板の間にはステンレス製のブロックが挿

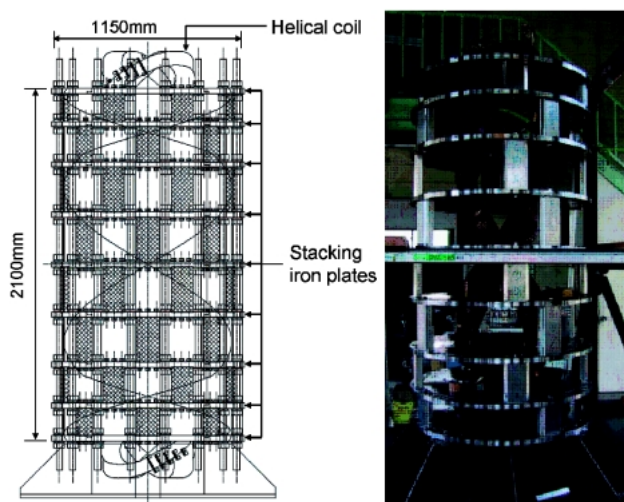


図21 組み立て構想図（左）と実物の写真（右）

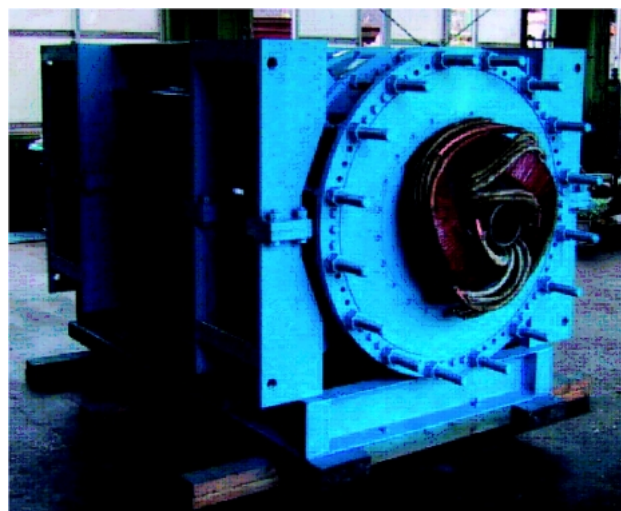


図23 完成した Warm Snake

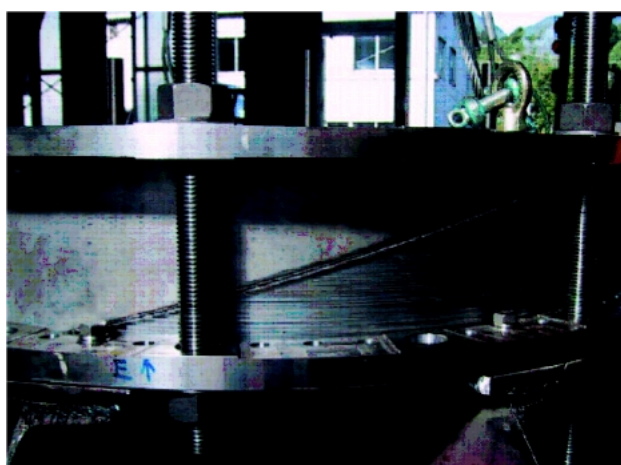


図22 一区間分のケイ素鋼板の積み上げ



図24 Warm Snake 内のヘリカルダイポール

入されており、各区間の間隔および螺旋ピッチの回転を正確に再現している。図22は実際に一区間分のケイ素鋼板を積み上げて固定したところの写真である。

以上の方法でヘリカルダイポールを完成させた。図23および図24は完成時の Warm Snake の写真である。鉄芯と架台はステンレス製のブロックで固定されているため、架台は Warm Snake 内の磁場に影響を与えない構造になっている。

Warm Snake 完成後、ポールピースの製作誤差の検査を行った。磁極間隙に外径 148 mm、長さ 3 m のパイプを挿入し、磁極間隙の製作誤差が 0.1% 以内であることを確認した。しかしながら、電磁石両端のポールピースが外側に 8 mm 膨らんでいることがわかった。これは電磁石全長の 0.76% に相当する誤差である。この製作誤差によって電磁石両端部分における磁場が三次元磁場計算の結果と異なる可能性がある。

この製作誤差による磁場の変化に関しては次節の磁場測定において補正を行った。

温度上昇幅については Warm Snake に 2700 A の電流を流し、冷却水の温度上昇の測定を行った。このとき、冷却水の水圧が 20 kgf/cm<sup>2</sup> であったため、設計値である 15 kgf/cm<sup>2</sup> のときの 15.3°C より換算して 13.2°C となるはずであるが、実際の測定結果では平均温度上昇幅は 10.5°C であった。これはコイル表面における自然空冷分を考慮していなかったためであるが、結果的に仕様を満たしていることから、運転上問題は無い。

### 3.6 ヘリカルダイポール内の磁場測定

ヘリカルダイポール内の磁場測定は高次の磁場を測定するためハーモニックコイル<sup>10)</sup>を用いて行った。ハーモニックコイルは Long dipole coil と Short tan-



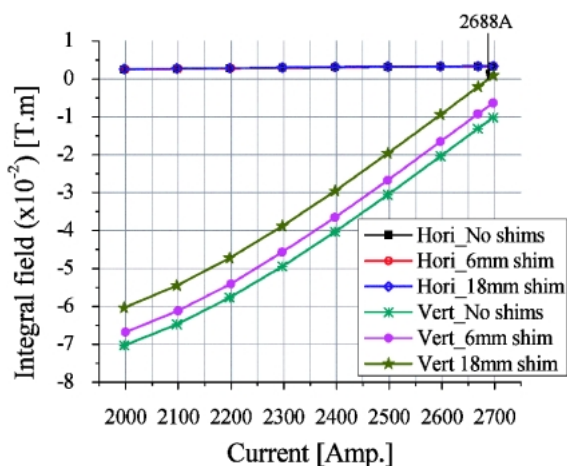


図25 Long dipole coil を用いた積分磁場の測定結果

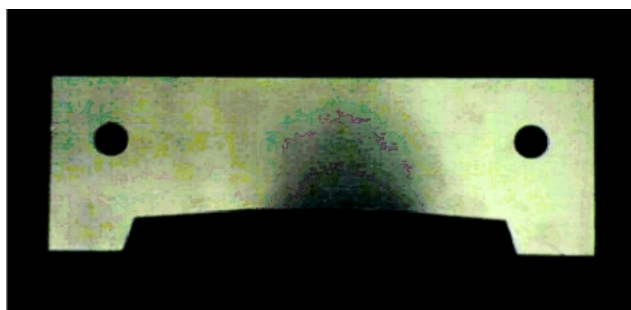


図26 有効磁場長調整用シム

gential coil の二種類を用いた。Long dipole coil は全長が 3582 mm であり、Warm Snake の全長より十分長く、電磁石両端における漏洩磁場を含めた積分磁場を測定することが可能である。Short tangential coil の全長は 50.9 mm であり、ヘリカルダイポール内の Longitudinal 方向の磁場強度分布および磁場方向の測定に用いた。以上の測定結果を三次元磁場計算の結果と比較し磁場の補正を行った。図 25 は Long dipole coil を用いたヘリカルダイポール内の積分磁場の測定結果である。

この測定では運転電流および有効磁場長を調整することで積分磁場がゼロになる点を探した。有効磁場長を調整するため、図 26 に示す厚さ 6 mm のシムをポールピースの端面に取り付けた。

積分磁場の測定結果からシムの厚さを 18 mm にし、2688 A で運転すると積分磁場をゼロにでき、AGS 加速器のビーム軌道への影響を与えずに運転できることがわかる。

次に、Short tangential coil を用いた磁場分布の測定結果を示す。測定は 2668 A, 2537 A, 2404 A で行

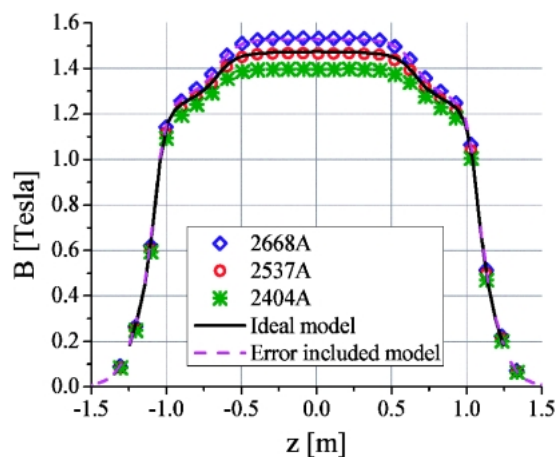


図27 ヘリカルダイポール内の磁場分布

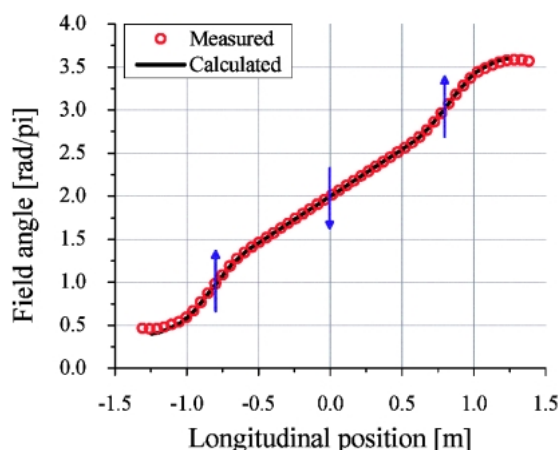


図28 磁場方向の測定結果と計算結果の比較

った。これは設計運転電流の 100%, 95%, 90% に相当する。図 27 は磁場分布の測定結果と三次元磁場計算結果の比較である。

この三次元磁場計算の結果は、製作誤差を含むものと含まない理想的なものの計算結果である。このとき、製作誤差は電磁石端部のポールピースの外側への膨らみと、それによるケイ素鋼板の積層率の変化を考慮したものである。測定結果と計算結果の比較から実機を 100% で運転したときの磁場分布と製作誤差を含む計算結果がほぼ同じ分布となり、製作誤差を考慮した三次元磁場計算モデルが実機を再現していると言える。

次に、ヘリカルダイポール内の磁場方向の測定結果と計算結果の比較を図 28 に示す。

この測定結果から磁場の向きの誤差は -1.2 m では 15.1%, +1.2 m では 0.78% である。電磁石両端における磁場方向誤差の違いは -1.2 m 付近にのみヘリ

カルコイルの端子があるためと考えられる。しかしながら、この磁場方向の誤差のある領域では磁場強度は低いためビーム軌道に与える影響は非常に小さい。

Short tangential coil を用いた測定では Dipole, Sextupole, Decapole の多極磁場成分の測定も行った。各成分の測定結果と計算結果の比較を図 29 に示す。

図 29 の縦軸は各成分の磁場強度 [T] を中心磁場強度 [T] で割って 10000 倍したものである。以上の多極磁場成分の結果について、電磁石中央 (0 m), Rapid pitch 領域中央 ( $\pm 0.85$  m), ヘリカルコイル両端領域 ( $\pm 1.2$  m) の点における計算結果と測定結果の差分を求め、計算結果を基準に割合でまとめたもの

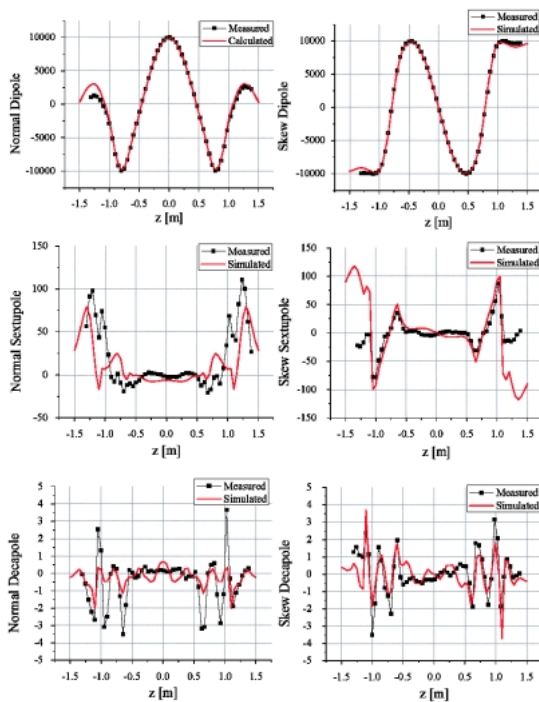


図 29 多極磁場成分の測定結果と計算結果の比較

表 2 多極磁場成分の比較

Position [m]	-1.2	-0.85	0	0.85	1.2
N-Dipole	15.7	2.1	0.3	1.2	6.6
S-Dipole	5.4	1.9	0.1	2.4	4.0
N-Sextupole	0.6	0.3	0.0	0.3	0.6
S-Sextupole	0.8	0.2	0.0	0.2	0.8
N-Decapole	0.009	0.001	0.005	0.002	0.003
S-Decapole	0.018	0.003	0.003	0.020	0.001

を表 2 に示す。

磁場方向の測定結果と同様に  $-1.2$  m の点における誤差が比較的大きいが、これもヘリカルコイルの電源接続用端子による影響であると考えられる。また、この領域の磁場強度は小さいため、この誤差によるビームへの影響は小さいものと考えられる。

#### 4. 偏極陽子の加速と Warm Snake

AGS 加速器に Warm Snake を導入する前に加速器軌道計算コード MAD-8<sup>11)</sup>を用いてベータファンクションの変化とチューンシフトをあらかじめ計算した。この際、Warm Snake の磁場は製作誤差を含む実機に近いものを用いた。図 30 および図 31 は Warm Snake を ON/OFF したときの水平および垂直方向のベータファンクションの比較である。

このように、Warm Snake を導入することによって水平および垂直の両方のベータファンクションが大

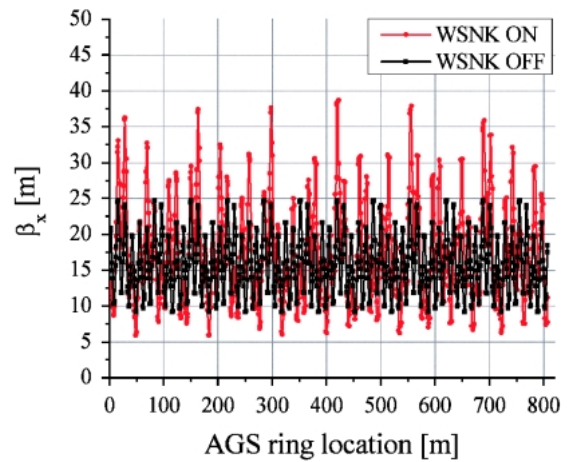


図 30 水平方向のベータファンクションの変化

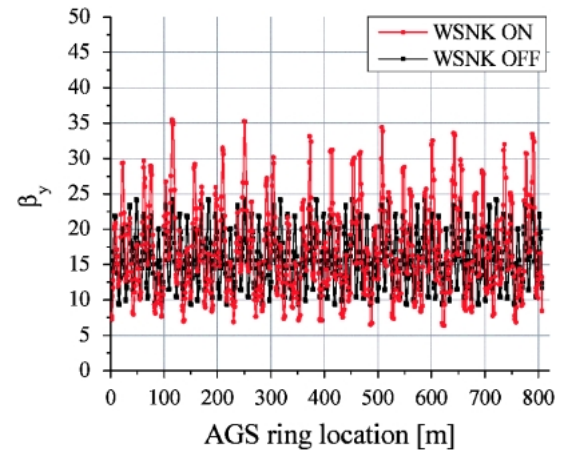


図 31 垂直方向のベータファンクションの変化

表3 チューンの計算結果と測定結果の比較

	MAD		Measured	
	$v_x$	$v_y$	$v_x$	$v_y$
WSNK OFF	8.844	8.767	8.820	8.687
WSNK ON	8.895	8.826	8.880	8.741
WSNK ON-OFF	0.051	0.059	0.060	0.054
$\Delta v$ [%]	0.577	0.673	0.680	0.622

きくなってしまうことが分かる．次に Warm Snake を ON/OFF したときのチューンシフトについて計算を行った．表3には実際に Warm Snake を AGS 加速器内で稼動したときの水平および垂直方向のベータatron チューンの測定結果も示す．

この結果より，Warm Snake が AGS 加速器全体のビーム軌道に影響を及ぼしていることがわかる．考えられる原因を以下に示す．

- Warm Snake 出口におけるビームの出射角度
- ヘリカルダイポール内の四極磁場成分によるビームの収束効果
- Warm Snake 出入口付近の六極磁場成分とビーム位置のオフセットによって生じるビームに対する収束効果

しかしながら，ベータatron チューンの変化分は 1 % 以内であり，AGS 加速器を運転する上では許容範囲である．図32に示すように Warm Snake を稼動した場合のほうが AGS 加速器内の Beam life time が改善される結果となった．

次に Warm Snake の運転電流を変化させたときの AGS 加速器内のビーム電流の測定結果を図33に示す．

このように設計運転電流より大幅に異なる運転電流で Warm Snake を稼動した場合，AGS 加速器内のビーム電流が極端に減少してしまう．これは Warm Snake を設計運転電流から大幅に異なる電流で運転した場合，ヘリカルダイポール内の積分磁場がゼロにならないため，ビームの螺旋軌道が Warm Snake 出口付近で出射角度をもってしまふからである．

2004 年の加速器運転では Warm Snake を 2700 A で運転した．減偏極の測定として，ビームエネルギーを変えながら Raw asymmetry の測定を行った．図34は 2004 年の Warm Snake を用いたとき，および 2003 年の Solenoidal Snake を用いたときの Raw asymmetry の測定結果である．

図34および表4に示したように，Transverse coupling resonance における減偏極は Solenoidal

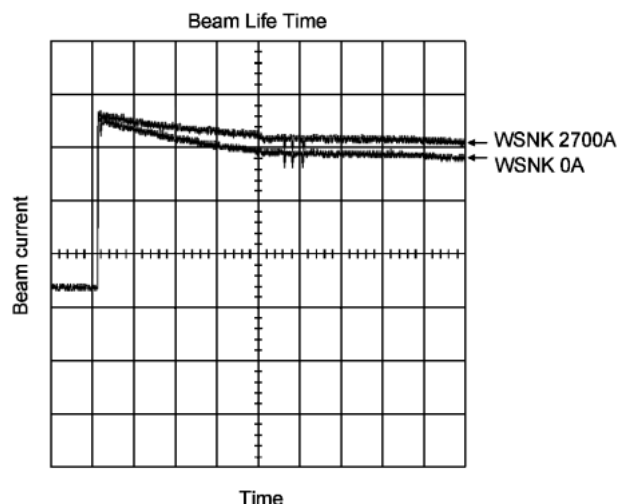


図32 WSNK ON/OFF の AGS 加速器ビーム電流の比較

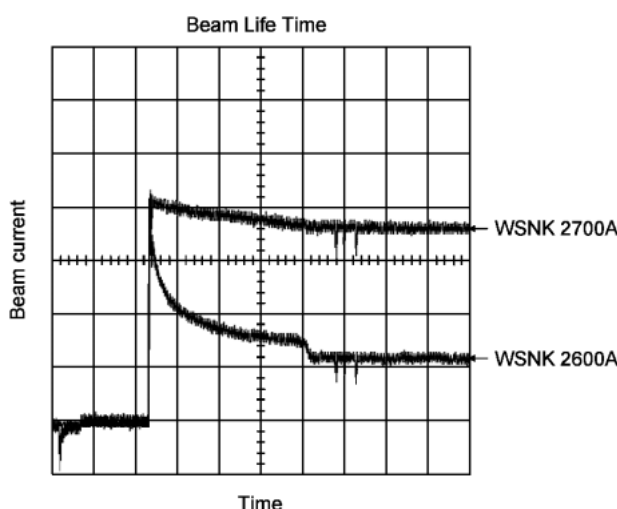


図33 AGS 加速器のビーム電流と WSNK 運転電流

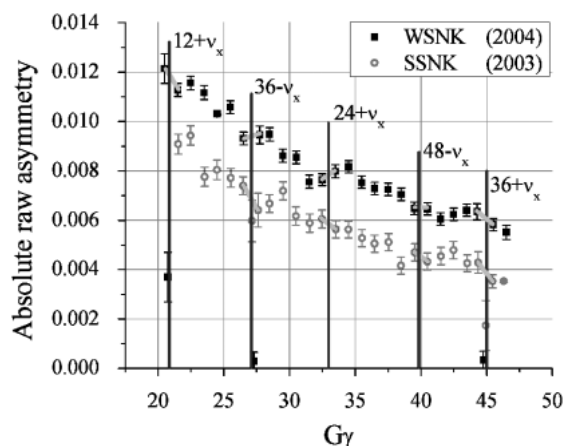


図34 Raw asymmetry の測定結果

表4 Transverse coupling resonance における WSNK と SSNK の Raw asymmetry の比較

G $\gamma$	SSNK	WSNK	WSNK-SSNK
36 - $v_x$	-13.4%	+1.5%	+14.9%
24 + $v_x$	-6.9%	+4.6%	+11.5%
48 - $v_x$	-8.3%	-0.5%	+7.8%
36 + $v_x$	-17.5%	-8.2%	+9.3%

表5 ビーム位置の平均変化量

Warm Snake 入口の ビーム入射位置	ビーム位置平均変化量 [mm]	
	水平方向	垂直方向
Ref. (0 mm)	5.36	3.25
水平 (-20 mm)	9.14	1.55
水平 (+20 mm)	9.83	6.86
垂直 (-20 mm)	2.83	1.94
垂直 (+20 mm)	1.61	7.66

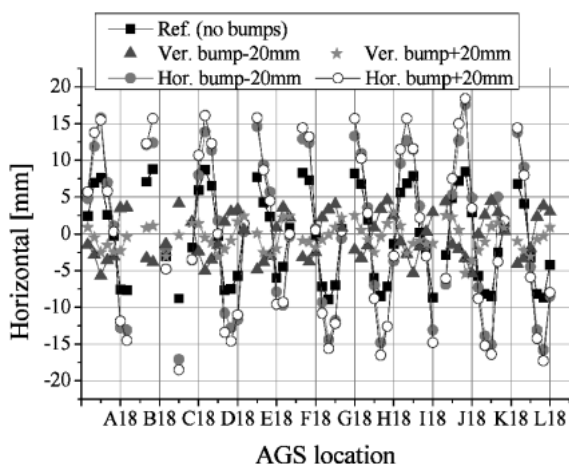


図35 Warm Snake 入口におけるビーム入射位置を変化させたときの水平方向のビーム位置の変化

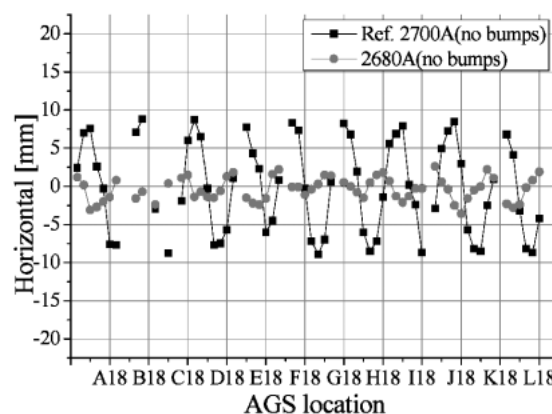


図37 Warm Snake の運転電流を変化させたときの水平方向のビーム位置変化量の測定結果

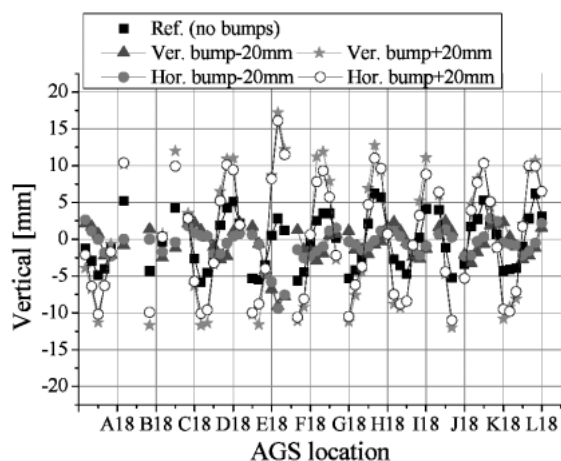


図36 Warm Snake 入口におけるビーム入射位置を変化させたときの垂直方向のビーム位置の変化

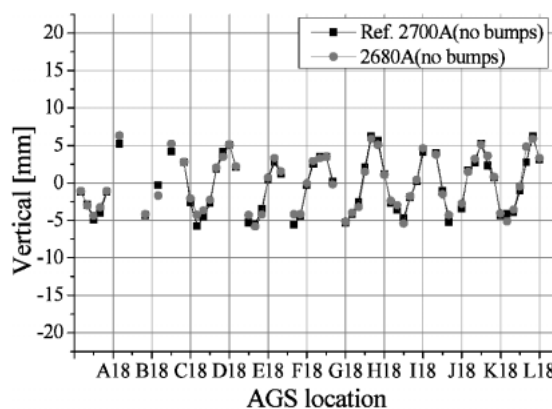


図38 Warm Snake の運転電流を変化させたときの垂直方向のビーム位置変化量の測定結果

Snake を用いた場合に比べ Warm Snake を用いた場合のほうが改善されている。その結果、2004 年の AGS 加速器出射エネルギーにおける偏極度は 50% に向上した。

2005 年には Warm Snake の運転電流を詳細に最適

化し、Warm Snake 入口におけるビーム位置を水平・垂直方向のビーム軌道調整用電磁石を用いて変化させることで、AGS 加速器全体のビーム軌道の調整を行った。まず Warm Snake の運転電流を 2700 A に固定し、Warm Snake 入口におけるビーム位置の調整を行った。図 35 および図 36 の縦軸は Warm

表 6 Warm Snake の運転電流を変化させたときの AGS 加速器全体のビーム位置変化量の平均値

Warm Snake の 運転電流	ビーム位置平均変化量 [mm]	
	水平方向	垂直方向
2700 A (Ref.)	5.36	3.25
2680 A	1.33	3.23

Snake を ON/OFF した際に BPM で測定した水平および垂直方向のビーム位置変化量であり、それぞれ Warm Snake 入口におけるビーム位置を水平および垂直方向に  $\pm 20$  mm 変化させたときの測定結果である。

表 5 は図 35 および図 36 に示した測定結果から得られたビーム位置変化量の平均値をまとめたものである。

以上より、Warm Snake 入口におけるビーム位置を垂直方向に  $-20$  mm だけ変化させることで AGS 加速器内の水平および垂直方向のビーム位置変化量を小さく抑えることが可能であることが分かった。

次に Warm Snake の運転電流を微調整することで AGS 加速器全体のビーム位置変化量の測定を行った。図 37 および図 38 は Warm Snake の運転電流を 2700 A および 2680 A に設定したときの測定結果である。

表 6 に上記の測定結果より得られたビーム位置変化量の平均値をまとめたものを示す。

この測定結果より Warm Snake の運転電流の最適化を行うことで Warm Snake を ON/OFF したときの AGS 加速器全体のビーム位置の変化量を小さくすることが可能であることが分かった。また、この測定結果は Long dipole coil を用いた積分磁場の測定結果を裏付けるものとなった。

以上の二種類の測定結果からこれらの手法を組み合わせることで AGS 加速器全体のビーム位置の変化量の最小化を行った。図 39 および図 40 は Warm Snake の運転電流を 2680 A にし、Warm Snake 入口におけるビーム位置を垂直方向に下げたときの水平および垂直方向の AGS 加速器全体のビーム位置の変化量の測定結果である。基準として運転電流が 2700 A のときの測定結果もプロットする。

表 7 に上記の測定より得られたビーム位置の変化量の平均値をまとめたものを示す。

以上より、Warm Snake の運転電流を 2680 A に設定し、Warm Snake 入口におけるビーム位置を垂直方向に  $-10$  mm 変化させることで Warm Snake を

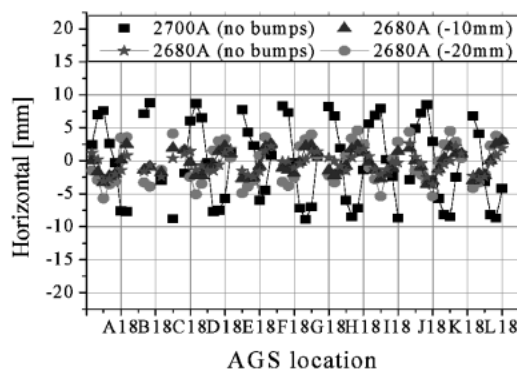


図 39 Warm Snake 入口におけるビーム位置と Warm Snake の運転電流を変化させたときの水平方向のビーム位置の変化量

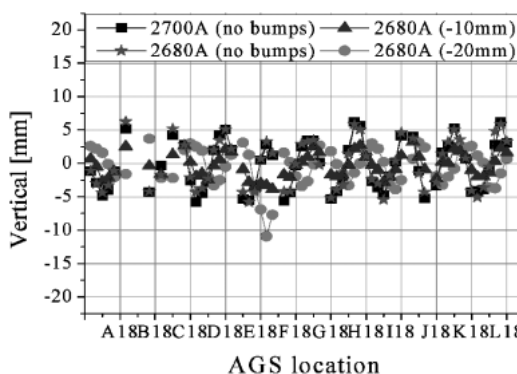


図 40 Warm Snake 入口におけるビーム位置と Warm Snake の運転電流を変化させたときの垂直方向のビーム位置の変化量

表 7 Warm Snake の運転電流および Warm Snake 入口におけるビーム位置を変化させたときの AGS 加速器全体のビーム位置変化量の平均値

WSNK の 運転電流	WSNK 入口の ビーム位置	ビーム位置平均変化量	
		水平方向	垂直方向
2700 A	0 mm	5.36	3.25
2680 A	0 mm	1.33	3.23
2680 A	$-10$ mm	1.65	1.61
2680 A	$-20$ mm	2.83	2.36

ON/OFF したときの AGS 加速器内の水平および垂直方向のビーム位置の変化量を最小化することができた。結果として AGS 加速器の出射エネルギーにおける偏極度は 55% を達成した。これは偏極度がビーム軌道に対し依存性があることを意味し、Warm Snake によるビーム軌道の変化によって四極磁場成分等によ

る影響で偏極度が落ちていたものと考えられる。

## 5. ま と め

BNLの偏極陽子加速器においてAGS加速器が偏極度のボトルネックとなっていた。これは当初用いられていたSolenoidal SnakeによってTransverse coupling resonanceが引き起こされていたためである。この問題を解決するためヘリカルダイポール形状を持つWarm Snakeを開発した。Warm Snakeは螺旋磁場を持つため、三次元磁場計算を用いて磁場の最適化を行った。製作段階においても正確に鉄芯を組み立てるための工夫を凝らしてある。電磁石完成後、ハーモニクコイルを用いて磁場の高次成分の測定を行い、三次元磁場計算の結果との比較を行った。製作誤差による磁場の誤差を補正した後、AGS加速器にWarm Snakeを導入し、偏極陽子ビームの加速実験を行った。その結果、Warm Snakeを用いた場合のTransverse coupling resonanceにおけるRaw asymmetryはSolenoidal Snakeを用いた場合に比べ改善していることを確認できた。Warm Snake導入前の2003年で40%であったAGS加速器出射エネルギーにおける偏極度は2004年のWarm Snake導入によって50%まで向上した。2005年にWarm Snakeの運転電流等を最適化した結果、偏極度はさらに向上し55%を達成した。

## 謝辞

Warm Snakeは理化学研究所と東京工業大学で共同開発した。理化学研究所・元前任研究員（現ブルックヘブン国立研究所・研究員）の岡村昌宏氏には本研究のすべてに渡って様々なご指導をいただきました。東京工業大学・原子炉工学研究所の服部俊幸教授には

本研究に対し色々アドバイスをいただき、博士論文作成の際には親身にご指導いただきました。また、延與秀人主任研究員をはじめとする理化学研究所・延與放射線研究室の皆様には米国での研究生活等において大変お世話になりました。この場を借りて心より御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) E. Leader and M. Anselmino, "A crisis in the parton model: where, oh where is the proton's spin?", *Z. Phys. C* **41**, 239 (1988).
- 2) European Muon Collaboration, "A measurement of the spin asymmetry and determination of the structure function  $g_1$  in deep inelastic muon-proton scattering", *Phys. Lett. B* **206**, 364 (1988).
- 3) The European Muon Collaboration, "An investigation of the spin structure of the proton in deep inelastic scattering of polarized muons on polarized protons", *Nucl. Phys. B* **328**, 1 (1989).
- 4) G. Bunce, N. Saito, J. Soffer and W. Vogelsang, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **50**, 525 (2000).
- 5) F. Z. Khari, *et al.*, "Acceleration of polarized protons to 22 GeV/c and the measurement of spin-spin effects in  $p \uparrow + p \uparrow \rightarrow p + p$ ", *Phys. Rev. D* **39**, 45 (1989).
- 6) J. Takano, *et al.*, "Design Study of a Normal Conducting Helical Snake for AGS", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. **14**, No. 2, 457-460 (2004).
- 7) H. Huang, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 2982 (1994); Ph. D. thesis, Indiana University (1995).
- 8) M. Bai, Ph. D. thesis, Univ. of Indiana (1999).
- 9) Vector Fields Inc., Oxford, UK.
- 10) A. Jain, Proc. CERN Accelerator School on Measurement and Alignment of Accelerator and Detector Magnets, (1997).
- 11) <http://mad.web.cern.ch/mad/mad8web/mad8.html>