

## 会議報告

## ニューファクト 07

大森 千広\*\*

The 9th International Workshop on Neutrino Factories,  
Superbeam and Betabeams (Nufact07)

Chihiro OHMORI\*

## 1. はじめに

国際会議ニューファクト 07 (和名「第 9 回ニュートリノ工場, スーパービーム, ベータビーム国際会議」) は 2007 年 8 月 6 日から 11 日まで岡山大学で開催された. 参加者は国内 58 名, 海外 91 名の計 149 名であった. この会議はニュートリノ物理に加えニュートリノファクトリーやスーパービームなどの将来のニュートリノ源についての議論を目的としている. このため, ニュートリノ実験, ニュートリノ散乱, 加速器, ミュオンの 4 つのワーキンググループが組織されている. この会議全体の報告はすでに高エネルギーニュースに会議の議長の作田氏が行っている<sup>1)</sup>. また, 会議の URL は <http://fphy.hep.okayama-u.ac.jp/nufact07/> である. したがって, ここでは加速器, ターゲットなどを中心に報告したい. しかし, いきなり会議の内容に行く前に, まず現在考えられているニュートリノファクトリーの基本シナリオについてまず説明することとする.

ミュオン崩壊をもちいたニュートリノファクトリーでは, レプトンでの CP 非保存の観測も視野にいれ, おおよそ  $10^{21}$  個のニュートリノを年間  $10^7$  秒の運転で 7000 km 離れた検出器まで送ることを目指している. このような数を実現するには数千 km 先のニュートリノビームの広がりを押さえて検出効率をあげなければならず, そのためにはミュオンビームの段階でビームを高品質化しておく必要がある. このためニュートリノファクトリーでは, まずミュオンを比較的 low エネルギーで生成し, それを数十 GeV まで加速した後, 長い直線部を持った蓄積リングに蓄え, リング内で崩壊させることによって, 高品質のニュートリノ



図 1 会場となった岡山大学 50 周年記念館

ビームを実現しようとしている (図 1 参照).

この会議は元々, ミュオンの蓄積リングでの崩壊を利用したニュートリノファクトリーの会議であったが, 蓄積リングを用いずに高い強度の陽子ビームをより巨大なニュートリノ検出器に打ち込む現行の方式 (スーパービーム) や不安定核をセルソンの SPS 相当のエネルギーまで加速して蓄積リングに蓄え崩壊させるベータビームなどの新しいアイデアが加わり, 現在の形となっている. この報告ではニュートリノファクトリーを中心とし, スーパービーム, ベータビームについては軽く触れるにとどめ, 別の機会に譲ることとする.

## 2. ニュートリノファクトリーとは

ここではまず, BNL, FNAL, LBNL などが中心となってまとめたニュートリノファクトリーの現時点でのベースとなっているシナリオ (ISS, International Scoping Study)<sup>2)</sup> にそってまずニュートリノファクトリーの主要要素を紹介する (図 2 参照).

最初にプロトンドライバーと呼ばれる速い繰り返しの陽子加速器が 4 MW のビームを供給する. ビーム

\* 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設  
(E-mail: Chihiro.ohmori@kek.jp)

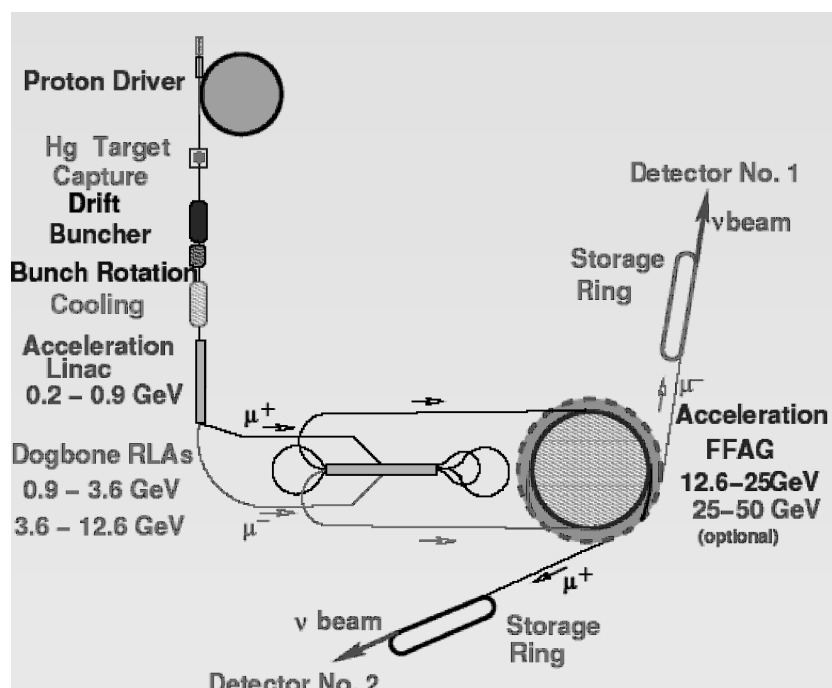


図2 ニュートリノファクトリーの概念図

のエネルギーはビームパワーあたりのパイオンの収量が最大になる数 GeV から 20 GeV 程度である。この 4 MW のビームパワーを受けるターゲットが次の重要な要素である。パイオンはソレノイドなどによって捕獲されミュオンへと崩壊する。発生したミュオンはまだエネルギーの広がりも大きく加速器のアーチャーに入りきらない。このため、縦方向の位相空間内でのバンチ回転と呼ばれる操作をおこない、エネルギーの広がりを小さくする。これを効率良く行うためには先のプロトンドライバーのバンチの長さは 2 ns 程度まで短くする必要がある。次にイオン化冷却によって横方向のエミッタンスを減らす。この後、いくつかの加速器を経て 20 から 50 GeV までミュオンを加速する。加速器は主にリニアック (0.9 GeV)、ドッグボーン RLA (Recirculating Linear Accelerator, 12.6 GeV) と FFAG (20–50 GeV) である。そして最後に Decay リングに入射され、約 500 ターンの間で崩壊し、指向性のよいニュートリノビームとなる。以下それぞれの加速器要素にしたがって会議の内容を紹介したい。

### 3. プロトンドライバー

プロトンドライバーの候補としてはシンクロトロン案、リニアック案、RCS (Rapid Cycling Synchrotron) 案、FFAG 案などがある。ISS では AGS のビーム強度を約 3 倍の  $2 \times 10^{14}$  ppp とし、さらに 5

Hz 運転して 4 MW を実現することを考えている。今回の会議ではセルンからリニアック案として SPL (Superconducting Proton Linac) + 蓄積リング + バンチ圧縮リング<sup>3,4)</sup>, RAL (Rutherford Appleton Laboratory) から ISIS アップグレード<sup>5)</sup>, KEK から小関氏による J-PARC MR についての報告があった。ISIS は現在の最強のパルス中性子源である (余談になるが、会議の時点では米国の SNS が試験運転で ISIS の強度を超える性能を出していたが、その後 ISIS が再度ビーム強度を上げ 2007 年末時点での最強となっている)。またプレナリーでは山崎氏が J-PARC 加速器の現状について報告した。ともに J-PARC の建設が順調に進んでおり、様々な技術的な問題を解決しつつあるとのことであった。T2K 実験に向け大強度のビーム加速を目指す J-PARC への期待が感じられた。セルンの相場氏はリニアック案について報告した。SPL は LHC のルミノシティ向上のために考えられている 1 GeV の SPL をさらに延長し、5 GeV にする。それを 2 つのリングで 2 ns という短パルスにするものである。蓄積リングはトランジション上で運転し、ビームバンチが縦方向に動かないようにする。一方圧縮リングはスリッページファクターを大きくし、バンチが位相回転しやすくする必要がある。エネルギーの最適化については 2 年前の会議で RAL の S. Brooks<sup>6)</sup> などの計算から数 GeV から 20 GeV 程度と考えられているが、セルンで現在おこな

われている HARP 実験<sup>7)</sup>のより精密な測定がプロトンドライバーのエネルギーの決定やミュオンの捕獲方式などの最適化に今後貢献していくことが期待されている。

プロトンドライバーのハードウェア開発として、RAL で front-end テストスタンドを作り、開発研究が行われている<sup>8)</sup>。

#### 4. ターゲット

ニュートリノファクトリーではパイオン発生のためのターゲットも加速器構成要素の一つであり、同じワーキンググループで議論している。必要となるニュートリノ数を実現するためには、陽子ビームのビームパワーは 4 MW にもなり、これを受けるターゲットにはこれまでに無い困難な問題があることが解っている。その一つが熱と放射線によるターゲットの劣化であり、個体ターゲットの場合の大きな問題である。一つの有力な候補として水銀ジェットを使う案があり、この実証のための実験 MERIT が間もなくセルンでビームを使って行われようとしている。ここ数年の会議ではプロトンドライバーからのビームの時間構造はよりターゲットに衝撃の少ない高繰り返しに適しているとのコンセンサスが得られている。

また、昨年は CNGS (CERN Neutrino to Gran Sasso) 実験のターゲットの報告があったが、今年には KEK の中平氏と RAL の C Densham 氏から T2K ターゲットの報告があった。

#### 5. 発生したパイオン、ミュオンの捕獲

ターゲットで発生したパイオンを捕獲し、ミュオンに崩壊させるために高磁場のソレノイドを用いることをニュートリノファクトリーでは考えている。J-PARC の LMF グループの中原氏や大阪大学 PRISM グループの吉田氏、さらに MICE からそれぞれの実験のためのミュオン捕獲ソレノイドの設計が報告された。昨年は CNGS のホーンの報告があったが、ことしは KEK の関口氏が T2K ホーンの報告をした。BNL からプラズマレンズを用いたミュオンチャンネルの計算結果の報告があった。

PRISM は J-PARC の陽子ビームによって発生した運動量広がり大きなミュオンを大口径の FFAG 加速器の中でバンチ回転することにより運動量広がり数%のビームにし、低バックグラウンドでの  $\mu e$  コンバージョン実験をおこなうものである。電磁石の製造や RF の試験などの結果が大阪大学の青木氏、有本氏、佐藤氏から報告された。

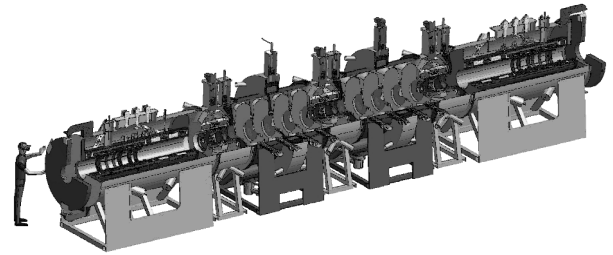


図 3 MICE 実験のセットアップ。左からソレノイド、水素標的、RF、水素標的、RF、水素標的、ソレノイドと並んでいる。ソレノイドの中には検出器がおかれている。ISIS シンクロトロン内部に設置されたターゲットからのミュオンが水素標的と RF で冷却されたことを実証しようとしている。

#### 6. イオン化クーリング

ニュートリノファクトリーでは線形加速器のアップチャーに入るようにミュオンビームのエミッタンスを小さくする必要がある。このためのイオン化冷却実証試験として MICE コラボレーション<sup>9)</sup>が進んでいる。これは RAL の ISIS に内部標的を設置し、ミュオンを発生、これを水素標的により減速しながら、200 MHz の RF 空洞により加速しミュオンビームのエミッタンスの測定をおこなうものである (図 3 参照)。今回は内部標的、捕獲ソレノイド、水素標的、RF に関する報告が行われた。来年早々に実験が開始される予定である。

この会議にはミュオンコライダーを検討しているグループも参加している。ミュオンコライダーでもニュートリノファクトリーと似た加速器構成が考えられているが、より冷却されたミュオンビームがルミノシティ向上のため必要となる。このため、ミュオンコライダーを視野にいれた MANX<sup>10)</sup> 実験では運動量方向も含めた冷却を目的としている。ここではミュオン捕獲のチャンネルにヘリカル磁場を用いている。こうした開発は今年から FNAL において Muon Collider Task Force という形でもサポートされている<sup>11)</sup>。

今回の会議で注目された実験として京都大学原子炉研で開発中の FFAG 加速器内部に内部標的とエネルギー損失を補うための加速空洞を組み込んだ ERIT<sup>12)</sup> がある。これが順調に試験されればイオン化冷却の実証試験にもなる。

#### 7. ミュオン加速

RLA はひとつの線形加速器にビームを何回も通す。加速粒子がミュオンであるため線形加速器を出た

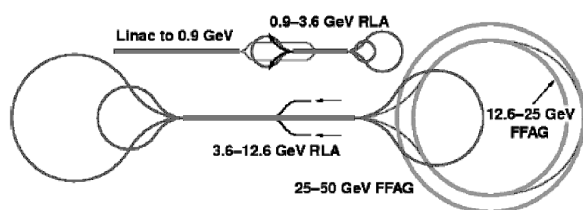


図4 ミュオン加速のためのドッグボーン RLA (ISS 版) とノンスケールリング FFAG

後のビームを droplet (雨滴) 型の軌道に沿って曲げ、同じ線形加速器に逆向きに入射する。全体の形が犬の骨に似ていることからドッグボーン RLA<sup>13)</sup>と呼ばれている (図4 参照)。これに関する発表では、CEBAF ではラティスの検討をここ数年続けており、FODO にすることにより、リニアックを通過する回数をこれまでの3回半から7回半にできるとの報告がなされた。現在の基本シナリオである ISS では RLA の加速エネルギーを 0.9 GeV から 12.6 GeV としているが、7回半通過できれば 32.5 GeV まで加速できることになる。ただし、この場合ビームを 180 度曲げるためのアーク部分は追加になるため、この部分にかかるコストと本来のシナリオである FFAG を使った場合のコストを比較する必要がある。

ミュオン加速のための FFAG については現在 Darasbury で建設中の EMMA (Electron Model for Muon Acceleration)<sup>14)</sup> についての報告があった。これは 10 MeV-20 MeV の電子の FFAG である。この特徴はこれまでに作られてきた粒子のエネルギーと軌道とのスケールリング則を満足する Scaling FFAG と異なり、これを満足しない初めての non-Scaling FFAG であることである。更に水平方向に位置をずらして設置された四極電磁石によってビームの軌道を曲げる機能もかねる、Linear 要素のみによって構成されるため Linear non-Scaling FFAG と呼ばれる。この加速器には縦方向の位相空間に Stable Fixed Point が 2 個あり、固定周波数の RF を用いて、この 2 つの点にそって約 10 周で 10 MeV から 20 MeV まで加速する。この FFAG での電子ビーム加速により、ミュオン FFAG での加速原理を実証しようとしている。この Linear non-Scaling FFAG では四極電磁石のアライメントの誤差は加速が十分に早いいため通常のシンクロトロンでの共鳴現象の振る舞いではなく“Random Walk”的なキックとして軌道のゆがみがでることが RAL の町田氏から示された<sup>15)</sup>。

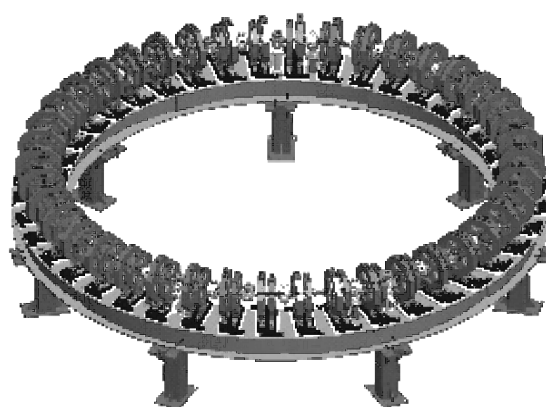


図5 英国ダラスベリー研で建設中の EMMA. 周長 16.6 m の小型の加速器で、ニュートリノファクトリーでのミュオン加速のための原理を実証しようとしている。

## 8. スーパービーム

ミュオンの蓄積リングを用いるニュートリノファクトリーに対して、現在の K2K, T2K, NuMI (Neutrinos at the Main Injector), CNGS 型をベースにより強度の高いビームを使うアイデアが“スーパービーム”である。例えば前述の SPL を使って大強度の陽子ビームを使うアイデアが今年の会議で報告されている。今回、FNAL より NuMI から次の NOvA 実験にアップグレードするためのビーム強度増強とホーンの改造についての報告があった。ビーム増強で大きな比重を占めるのは現在のコライダー実験でのルミノシティ向上に貢献しているスリップスタッキング<sup>16)</sup>と呼ばれる複数のブースターからのビームバンチを 1 つにまとめる RF を用いたビーム操作である。この手法を用いた NOvA のための予備実験でビーム損失が許容できる範囲におさまったとの報告があった (図6 参照)。また、この関連では T2K と NuMI ビームについての報告があった。NuMI のターゲットへ供給された陽子の数は 7 月の時点で  $2 \times 10^{20}$  に達した。NuMI で興味深かったことは放射化したホーン周りでの修理作業では、作業員の被爆量を押さえるためモックアップを製作し、作業の練習をしている。現在、加速器が動き出そうとしている J-PARC でもこうした例は参考になると思う。このためには加速器やターゲット、ホーンなどの装置の図面をキチンと管理しなければならない。現場あわせなどで作ったものでも図面化しておく必要がある。

## 9. ベータービーム

ベータービーム<sup>17,18)</sup>はニュートリノをミュオンから

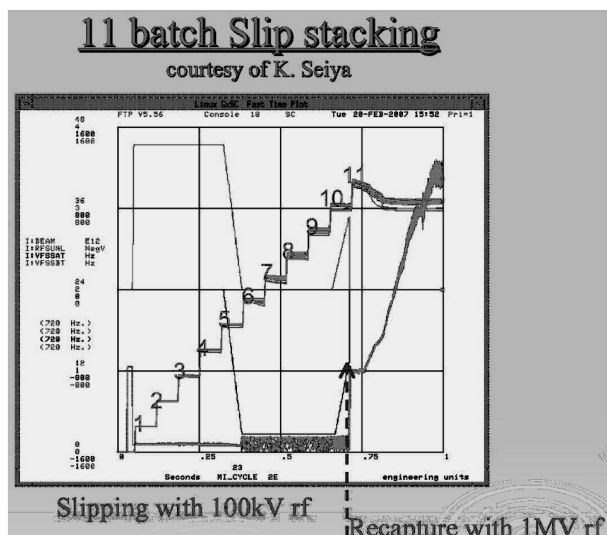


図6 NOvAのためのスリップスタッキングの例. 11個のブラスターのバンチをまとめ、1バンチにしている。

の崩壊の代わりに半減期の短い核種の崩壊を使ったビームである。 ${}^6\text{He}$ などを高エネルギーまで加速してニュートリノファクトリーと同様に蓄積リング（崩壊リング）に入射し、崩壊させる。ここでの問題の一つは崩壊リング内で核種の崩壊によって生じた娘核がリング内で損失し、放射化や超伝導電磁石のクエンチなどを招く点であり、そのための保護のコリメータについての報告がセルンからあった。また、LHCのアップグレードで検討されているPS2やSPS2において、ベータビーム加速に於ける問題点が指摘された。

## 10. おわりに

この会議の加速器ワーキンググループにはある目的がある。それは、実現可能なニュートリノファクトリー加速器のシナリオをまとめることである。目標として2010年にIDR (Interim Design Report), 2012年にRDR (Reference Design Report)としている。EMMAが2009年ビームON, MICEも2009年にRF2台を含んだ完成型となる予定である。今後の数年間はニュートリノファクトリーのための加速器開発

にとって非常に重要な時期となっていくと思われる。

## 参考文献

- 1) 研究会報告“第9回ニュートリノ工場, スーパービーム, ベータビームの国際会議 NuFact07 (Aug.6-11, 2007, Okayama, Japan)”, 作田 誠, 高エネルギーニュース. Vol. 26, No. 2, 121-123.
- 2) BNL-72369, FNAL-TM-2259, LBNL-55478, Neutrino Factory and Beta Beam Experiments and Developments.
- 3) F. Gerick (ed.) et al., CERN-2006-006 (2006).
- 4) R. Garoby, Presentation at Nufact06, <http://edms.cern.ch/document/808084/1>
- 5) C. R. Prior, “Upgrade to the ISIS Spallation Neutron Source”, Proc. of APAC2006, WEZMA01.
- 6) S. Brooks, “Computed Pion Yields from a Tantalum Rod Target: Comparing MARS15 and GEANT4 Across Proton Energies”, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 155 (2006) 295-296.
- 7) M. G. Catanesi et al., CERN-SPSC-99-35. M. G. Catanesi et al., NIM A571 (2007) 527.
- 8) A. P. Letchford et al., The RAL Front End Test Stand, EPAC-2006, poster MOPCH112.
- 9) P. Drumm (ed.), “MICE: an International Muon Ionisation Cooling Experiment,” Technical Design Report; see [http://www.isis.rl.ac.uk/accelerator/MICE/TR/MICE\\_Tech\\_ref.html](http://www.isis.rl.ac.uk/accelerator/MICE/TR/MICE_Tech_ref.html).
- 10) MANX Letter of Intent, available from [http://www.muonsinc.com/tiki-download\\_file.php?fileId=230](http://www.muonsinc.com/tiki-download_file.php?fileId=230)
- 11) Muon Collider Task Force Report, FERMILAB-TM-2399-APC, December 2007.
- 12) Y. Mori, Nucl. Instr. Meth., PRS, A563 (2006) 591-595.
- 13) S. A. Bogacz, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 29, 1723, (2003).
- 14) R. Edgecock, “EMMA-The World’s First Non-Scaling FFAG,” Proc. of PAC07, pp. 2624-2626.
- 15) S. Machida, “Orbit and optics distortion in fixed field alternating gradient muon accelerators”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10, 114001 (2007).
- 16) K. Seiya et al., “Multi-Batch Slip Stacking in the Main Injector at Fermilab”, Proceeding of PAC07, TUODKI03, p742-744
- 17) P. Zucchelli, “A novel concept for a neutrino factory: the beta-beam”, Phys. Let. B, 532 (2002) 166-172.
- 18) <http://www.ganil.fr/eurisol/3>.