

# ネットワークを使用した、中性子計測システムの開発

○佐藤節夫<sup>A)</sup>、武藤豪<sup>A)</sup>、中谷健<sup>B)</sup>、大友季哉<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 中性子科学研究施設 (KENS)

<sup>B)</sup>日本原子力研究開発機構 J-PARC センターMLF ディビジョン

## 概要

中性子を利用した物性の解明や新材料の開発への期待は、ここ数年で非常に高まってきています。例えば高性能な2次電池の開発や高温超電導体の構造解析での中性子の産業利用です。それらの精密測定には巨大な中性子検出器システムが必要です。J-PARC/MLF (Material and Life Science Facility of Japan Proton Accelerator Research Complex) の中性子実験装置はこれら要求を満たす、非常に広い面積を細かい位置分解能と時間分解能で測定できる巨大な検出システムを数多く建設しています。代表的な装置の粉末解析分光器や小角散乱分光器では1000本を越える中性子検出器が使用され、数十m<sup>2</sup>の面積を1cm<sup>2</sup>程度の位置分解能と1μ秒程度の時間分解能で中性子を観測します。従来のPSD2Kシステムでは200本程度の制御が限界でした。そこで、この差を埋めるべく1000本を越える検出器でも制御できるNEUNET中性子計測システムを開発しました。

今回発表の「ネットワークを使用した、中性子計測システム」の中心的な開発機器は、NEUNETモジュールとGATENETモジュールです。J-PARCの中性子フラックスの高さを生かした多様な実験を展開する上で、一個一個の中性子検出イベントを個別に記録すること、イベント発生率に応じて計測システムの処理能力を上げられるような、スケーラブルなシステムであることが必要です。NEUNETモジュールとGATENETモジュールは、こうしたニーズに答えるものです。

NEUNETモジュールは、中性子検出器からの信号(パルス波高)と中性子飛行時間から生成した中性子検出イベントを先入れ先出しメモリ(FIFO)に蓄積し、高速ネットワーク回路(KEK素核研・測定器開発室が開発したSiTCP回路)を通じて、制御する計算機(PC)に送り出します。

GATENETモジュールは、複数のNEUNETモジュールに、中性子飛行時間原点を規定するt0信号(パルス中性子が発生した時を正確に知らせる信号)と外場の変動と関連づけるための実時間信号を配送するモジュールです。GATENETモジュールもSiTCP回路を持ち、ネットワークから制御されます。

技術的特徴をまとめますと、次の3点が挙げられます。

- ネットワークを中性子計測システムの高速度データバスとして使用する。
- 観測できた中性子情報をイベントデータとして全て保存する。
- 測定装置の大型化によってデータが分散するので、絶対時刻で同期を取る。

## 1 J-PARC/MLF 中性子実験施設

J-PARC 全体については <http://j-parc.jp/MatLife/ja/index.html> を、MLF 中性子実験施設については <http://j-parc.jp/MatLife/ja/instrumentation/ns.html> を参照してください。

概要としましては、茨城県東海村の日本原子力機構内に図1のような実験施設が建設されました。中性子散乱実験は、3 GeV シンクロトロン陽子ビームを使用する物質・生命科学実験施設(MLF)で実験が行われます。中性子実験施設は図2のように23本のビームラインが引き出せる構造になっていて、それぞれが特徴的な実験ができるようになっています。ビームラインはBL01からBL23までの番号が振られています。平

成 21 年 3 月現在までに、半数の 12 本のビームラインにビームが供給され始めました。



図 1 J-PARC 施設

本技術の性能が認められて、J-PARC/MLF 中性子実験装置に広く採用されています。図 3 に BL20 の中性子検出器の配置例を示します。BL20 は茨城県の粉末解析分光器で、写真で見えている範囲は直径 13mm で長さ 60cm の中性子検出器が 288 本配置してあります。約 2.2m<sup>2</sup> の領域を通過する中性子を捕まえることができます。BL20 全体では 800 本 (6.2m<sup>2</sup>) が装着されています。

図 4 は BL20 の NEUNET モジュールです。100 台あり 800 本の中性子検出器の処理ができます。

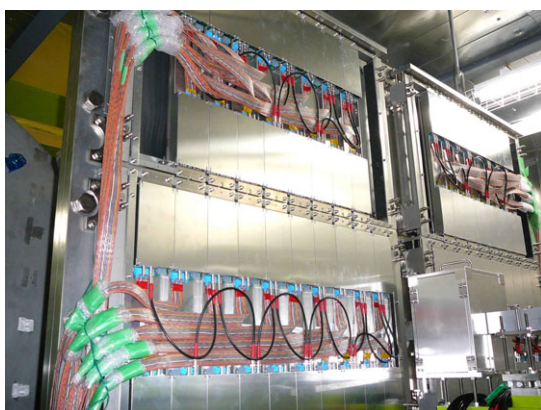


図 3 中性子検出器の配置例 (BL20)

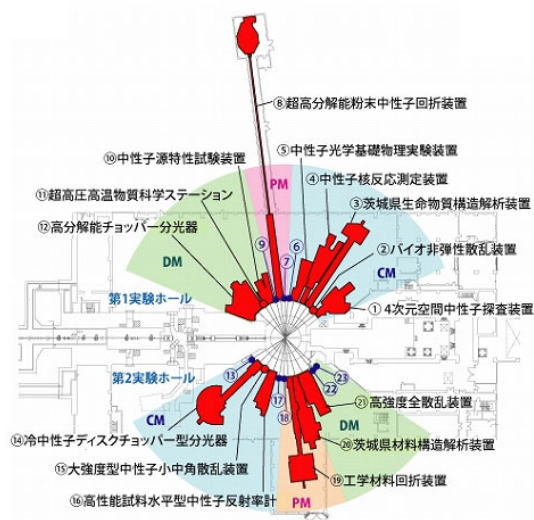


図 2 物質・生命科学実験施設 (MLF)

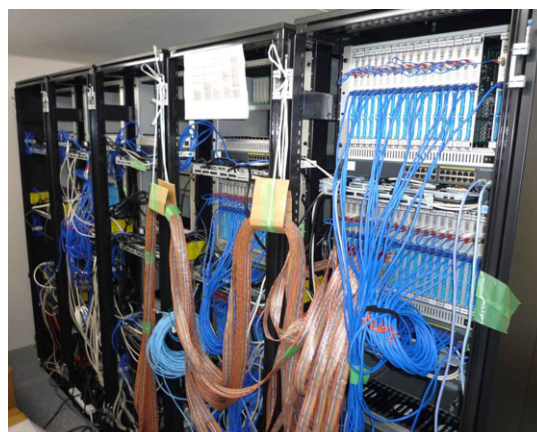


図 4 NEUNET システムの配置例 (BL20)

平成 21 年 3 月現在での NEUNET モジュールの使用状況は、BL01, BL08, BL12, BL14, BL20, BL21 の 6 本のビームラインで製作、または製作が予定されています。BL01 で 24 台の、BL20 で 100 台の NEUNET モジュールがすでに納品されて実験を開始しています。BL14 で 40 台、BL08 で 38 台、BL21 で 93 台が製作中です。BL20 で 36 台が増産中です。今後、BL12 で使用を予定しています。さらに、BL08 と BL21 では増産を予定しています。これに伴い、従来の開発品である AMP97 アンプ基板なども対応する数だけ作製されていて、本技術と従来技術が幅広く活用されています。

## 2 パルス中性子源の飛行時間測定法

J-PARC/MLF 中性子実験施設では、パルス中性子源を使用して物質の構造解析などを行います。水銀ターゲットに 25Hz (40m 秒周期) で 3GeV の高エネルギーに加速した陽子ビームを照射して、核破砕反応を起こして大量の中性子を発生させます。陽子ビームの時間幅を 1μ 秒程度にしますので、40m 秒周期から見ると 4

万分の1の出来事で、瞬時と言えます。この瞬時に核破砕反応が起こり、3GeV以下のエネルギーを持つ無数のパルス中性子が発生します。

パルス中性子源を使用した実験は飛行時間測定法を使用します。水銀ターゲットから一定の距離（15~20m程度）離れた場所（L）に測りたい試料を置くと、パルス中性子発生からの経過時刻（t）の2乗に反比例した運動エネルギー（ $E = 1/2mV^2 = 1/2m(L/t)^2$ ）の中性子を照射することができます。現在の電子技術に於いては、tの測定を正確にできるので、簡単に照射されている中性子エネルギーがわかります。この方法は飛行時間測定法（Time of flight method : TOF 法）と呼ばれ、他の多くのところでも使用されています。

### 3 NEUNET 中性子計測システム

NEUNET 中性子計測システムの最小構成図を図5に示します。中性子位置敏感型検出器（PSD）を支持し、アンプを内蔵する PSD 支持箱（図中 PSD box）で中性子を検出し、電気信号に変換します。その信号をケーブルで結ばれた NEUNET モジュールが集め、中性子情報を持つイベントデータとしてネットワークで PC（図中 Linux）に送ります。

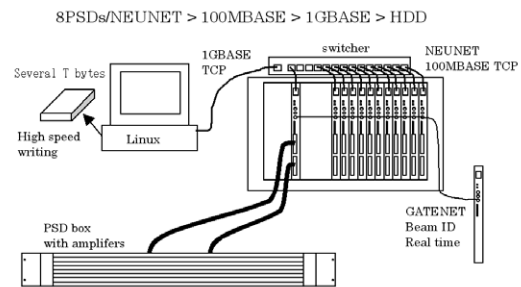


図5 NEUNET 中性子計測システム

データの同期を取るために、GATENET モジュールが同期用の時刻情報を全ての NEUNET モジュールに配り、イベントデータ内に組み込みます。データ解析を行う時に、この時刻情報を比較することで、多くの NEUNET モジュールのデータを同期して統合することができます。

NEUNET モジュールからのネットワークデータ転送速度は 100MBASE ですが、1GBASE 対応のネットワークスイッチャーを通すことで 10 倍の高速化がされます。将来、10GBASE が使用できるようになると、このままの構成で 100 倍の高速化ができます。ネットワークを高速バスとして使えるわけがここにあります。

ネットワークからイベントデータを受け取った PC は内外のハードディスクに全データを保存します。

#### 3.1 NEUNET モジュール

NEUNET モジュールは KENS の中性子測定技術と KEK 素粒子原子核研究所（KEK-IPNS）のネットワーク技術（SiTCP）から成り立っています。図6に NEUNET モジュールを示します。NEUNET モジュールは VME/6U 規格の1枚幅（23cmx16cmx2cm）で、8本の PSD データ処理ができます。右側の4枚の ADC 基板が中性子信号をデジタルデータに変換します。左側のゲートアレイ（FPGA）がモジュール上の全ての部品を制御します。

図7に NEUNET モジュールの構成図を示します。PSD で中性子が検出されると、両端から検出位置に逆比

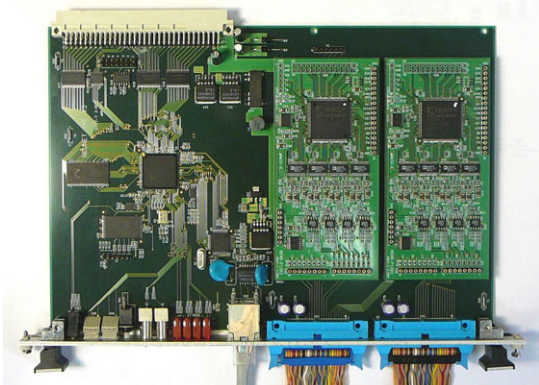


図6 NEUNET モジュール

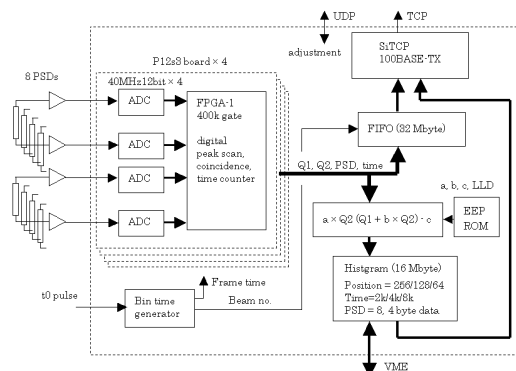


図7 NEUNET モジュール構成図

例した電荷が出力されます。この電荷を電圧に変換するアンプで電荷量に比例した高さを持つパルスとして、多芯フラットケーブルで引き出されます。ADC 基板上では、このパルス信号をアナログーデジタル変換器(ADC)でデジタル化します。図8にその概念図を示します。ADC 基板の FPGA が図8のような ADC 出力データからピークを検出し、その時の基底値とピークの差から波高値を求めます。PSD の両端からの波高値の合計が閾値より大きければ中性子データとして保存します。両方の波高値と中性子検出時の時刻はメイン基板上の FPGA に送られます。

NEUNET モジュールはイベントとヒストグラムデータを持ちます。ヒストグラムデータは度数分布図のことで、ある規則でデータを整理してしまい、元のデータを捨ててデータ量を減らす方式で、従来の PSD2K システムで採用していました。

メイン基板上の FPGA は ADC 基板からデータを集め、イベントデータとして保存し、同時にヒストグラムデータを更新していきます。イベントデータは SiTCP 側から制御でき、ヒストグラムデータは SiTCP 側と VME 側から制御できます。イベントモードとヒストグラムモードの両方は独立に動作します。

VME 回路は、これまでに KENS で開発してきているヒストグラムモードの全てを含んでいるので、NEUNET モジュールは PSD2K モジュールと互換性があります。

イベントモードでは図9のようなデータの流れと構成になります。制御 PC が NEUNET モジュールに保存しているイベントデータを要求します。このときに受信できる最大データ数をつけます。NEUNET モジュールは保存しているイベントデータ数を4バイトデータで返します。データ数が0ならば、これでこのやり取りはおしまいです。イベントデータを持っていれば、指定された最大データ数以内でイベントデータを送ります。1 中性子のイベントデータは8バイトです。構成は右波高値=12bit、左波高値=12bit、TOF 時間=24bit、PSD の番号=8bit、識別番号=8bit となります。

この他に、GATENET モジュールから配信されるデータがありますが、いずれも8バイト長に統一しています。同期用時刻データには2種類あり、必ず対で保存されます。ひとつは40ビットのパルス中性子フレームの番号です。J-PARC では25Hz ごとにビームが発生するので、25Hz ごとに加えられます。構成は KP-ID=40bit、識別番号=8bit、その他=16bit となります。1000 年分以上を表現でき、イベントデータの仕分けに使用できます。次に装置時刻イベントが続きます。構成は絶対時刻=56bit、識別番号=8bit となり、2008 年1月1日を基点に、34 年程度を表現できます。

SiTCP は CPU を使用していない高速ネットワーク回路です。100MBASE-TX で、TCP/IP 通信ではほぼ最高値の転送速度(11Mbyte/sec)が実現できます。現在のテスト回路では8Mbyte/sec 程度が観測されています。通常の実験では、1本の PSD は最大計数で30kcps(cycles per second)程度の中性子しか検出できません。NEUNET モジュールは8本の PSD データを処理するので、最大転送は  $8 \times 30\text{kps} \times 8\text{byte} = 1.92\text{Mbyte/sec}$

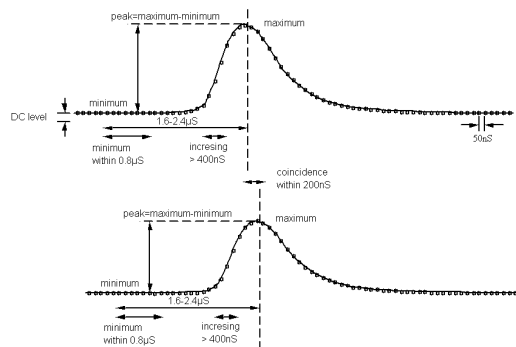


図8 PSD 測定の概念図

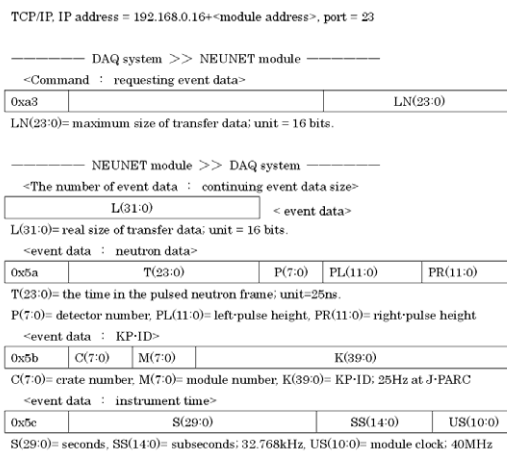


図9 イベントデータの流れと構成



となります。従って、最大計数の場合でも十分に余裕があります。

SiTCP は 100MBASE-TX ですが、1000BASE-T 対応のネットワークスイッチャーを通すことで 1000BASE-T に変換され、高速にできます。スイッチャーは多くの NEUNET モジュールのデータを 1 本のネットワークケーブルにまとめて 1 台の PC につなぎます。NEUNET モジュールの 1 台 1 台のネットワークスピードはそれほど速くありませんが、ネットワークスイッチャーが高速なデータバスの役割を果たすことができます。仮に、50% 程度の使用率であっても 26 台の NEUNET モジュールをつないで 50M バイト/秒の転送レートとなることがわかります。今までの測定では、テスト信号を使用して 44M バイト/秒程度までは取りこぼしなく使用できることが確認できています。標準ラックに収まる VME 電源クレートは 20 台の NEUNET モジュールを収納できるので、1 台の PC で制御すれば最大計数の状況でも安全に使用できることがわかります。

SiTCP は UDP/IP 通信もサポートしていて、データ通信と独立に設定情報の読み書きができます。例えば、モジュール情報の読み書き、またはネットワーク通信方式をイベントモードかヒストグラムモードか、どちらかを選びます。次に、ヒストグラムデータの位置計算用の係数を不揮発性メモリに読み書きできます。また、イベントデータの制限定数を設定できます。たとえば、パルス中性子発生直後のバースト信号を排除するための制限時間を設定できます。また、ノイズが多い場合、閾値を上げて排除することができます。

### 3.2 GATENET モジュール

GATENET モジュールも SiTCP を使用しています。図 1 0 に GATENET モジュールを示します。左側の FPGA がモジュール上の全ての部品を制御します。図 1 1 に GATENET モジュールの構成図を示します。ネットワークの基本的な動作は NEUNET モジュールと同じになるようにしました。

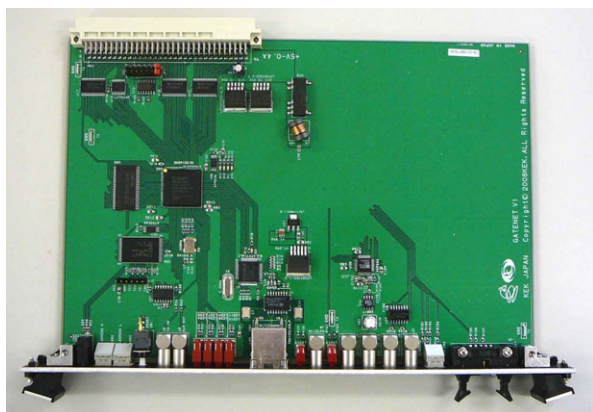


図 1 0 GATENET モジュール

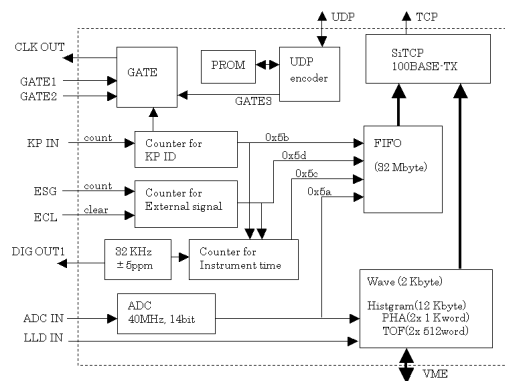


図 1 1 GATENET モジュール構成図

GATENET モジュールはいろいろな機能を持ち、巨大な DAQ システムが同期して動作できるように支援します。第一の機能はゲート機能です。パルス中性子に同期した信号 (J-PARC:MLF の場合、25Hz) を受けて、パルス番号と絶対時刻を付加し、全 NEUNET モジュールに配信します。同期信号の配信は 1 本の同軸ケーブルで行います。全 NEUNET モジュールに対しては負荷が大きくなるので、バッファを介して送ります。

図 1 2 に同期信号のデータ形式を示します。初めに立ち上がりパルス中性子に同期したスタートビットを 5  $\mu$  秒幅パルスとして送ります。その後 104 ビット列が続きます。各ビットの値をパルス幅で表します。1  $\mu$  秒幅が 0 を、2  $\mu$  秒幅が 1 を表すようにしました。各パルスの区切りは 1  $\mu$  秒固定です。前半 8 ビットがクレート番号、

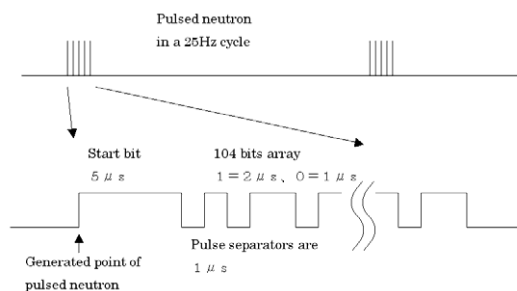


図 1 2 同期信号のデータ形式

中間 40 ビットがパルス番号、後半 56 ビットが装置時刻の順です。213  $\mu$  秒から 317  $\mu$  秒までの間で変動しますが、パルス中性子は 40m 秒に 1 度しか来ませんので、十分に識別できます。

この信号はゲート条件に合わない場合には配信されません。ゲートの条件として、UDP/IP を通してプログラムから掛けられるのとハードウェアから掛けられる端子を 2 入力持ちます。試料周りの真空や温度に異常がある場合、センサーが出すリレー接点出力が受けられます。GATENET の名前の由来がここにあります。

次にビームラインの強度観測用モニターのデータ収集ができます。この機能はアナログ入力とデジタル入力を持ち、波形解析と時間分析ができます。

その他に、t0 信号以外の外部信号を受けて、そのカウント数と絶対時刻の管理ができます。過度現象の実験などに威力を発揮するはずです。

#### 4 まとめ

開発に当たり、非常に多くの方々の協力を得られたことに感謝します。SiTCP を開発されました内田智久氏、それを斡旋してくれた田中真伸氏、NEUNET システムの DAQ プログラムを開発してくれている安芳次氏、仲吉一男氏、千代浩司氏の KEK 素核研の方々に感謝します。その他、多くの関係する方々にも多大なお世話をいただき、感謝しています。

J-PARC/MLF のビーム出力は 2009 年 12 月に 300kW を達成し、今後さらに高くなっていく予定です。今のままの検出器では能力不足のため、引き続き次の検出器処理装置の開発に関わって行きたいと思います。

#### 参考文献

- [1] S. Satoh, S. Muto, N. Kaneko, T. Uchida, M. Tanaka, Y. Yasu, K. Nakayoshi, E. Inoue, H. Sendai, T. Nakatani, T. Otomo, Development of a readout system employing high-speed network for J-PARC, during a contribution to International Symposium on Pulsed Neutron and Muon Sciences (IPS 08), NIM A 600(2009)103-106
- [2] Development of Electronics for  $^3\text{He}$  Detectors at KENS, S. Satoh, KENS REPORT-XV 2003-2006.
- [3] Development of Readout Systems for Neutron Detectors, S. Satoh, NSL News Letter 2006-1, 6<sup>th</sup> Korea-Japan Meeting on Neutron Science
- [4] 中性子検出器の読み出し回路の開発、佐藤節夫、日本中性子科学会一波紋、Vol.15 No.1、2005 年 1 月号 p78~81
- [5] S. Satoh, T. Ino, M. Furusaka, Y. Kiyanagi, N. Sakamoto, K. Sakai, Development of readout systems for neutron detectors, PSND2004, Nuclear Inst. and Meth. A 529 (2004) 421-424
- [6] 中性子散乱実験用位置敏感検出器、PSD2K システムの開発、佐藤節夫(他 3 名、1 番目)、KEK Report 2001-9、M/D