

FOUNDATION FOR HIGH ENERGY
ACCELERATOR
SCIENCE

FASだより

2013.6 第6号







公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会

FASだより 第6号 目次

1.		にネルギー加速器科学研究奨励会 褒章受賞者 平成25年2月18日)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
2.	褒章受賞者の研究 1) 西川賞	報告	
	(1)受賞者氏名 研究題目	中村剛氏・小林和生氏(高輝度光科学研究センター)・・・・・・・「FPGAを用いた高機能bunch-by-bunch フィードバックシステムの開発研究」	2
	(2)受賞者氏名 研究題目	和田 健氏(高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所)····「KEK低速陽電子ビームの強度増強とその応用に関する研究」	8
	2) 小柴賞受賞者氏名研究題目	内田智久氏(高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所)・・・「ハードウェアベースの通信制御演算装置を用いた高速データ収集システムの開発研究」	14
	3) 熊谷賞 (1) 受賞者氏名 研究題目 (2) 受賞者氏名 研究題目	伊藤 進氏(元・㈱東芝 京浜事業所)・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
3.	第2回 西川シンポミ	ジウム開催記録について(平成25年3月13日)· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	27
4.	高エネルギー加速器	Bセミナー OHO'13開催予定について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
5.	第3回特別会講演会	開催予定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	29
6.		ネルギー加速器科学研究奨励会 西川賞・小柴賞・諏訪賞 要綱について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
7.	平成24年度 事業報	B告及び収支決算について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
8.	編集後記	And Springs 18 and 19 a	

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 褒章受賞者の表彰式



平成25年2月18日 受賞者及び関係者の記念写真

各賞受賞者及び研究課題

1. 西川賞

1)受賞者氏名 研究題目

中村剛氏・小林和生氏(高輝度光科学研究センター)

「FPGAを用いた高機能bunch-by-bunch フィードバックシステムの開発研

究」

2)受賞者氏名 研究題目

和田 健氏(高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所) 「KEK低速陽電子ビームの強度増強とその応用に関する研究」

2. 小柴賞

受賞者氏名 研究題目

内田智久氏(高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所) 「ハードウェアベースの通信制御演算装置を用いた高速データ収集システムの開発研究」

3. 熊谷賞

1)受賞者氏名 研究題目

伊藤 進氏(元・㈱東芝 京浜事業所) 「超伝導磁石の開発をはじめとする加速器科学への開拓的貢献」

2)受賞者氏名 研究題目

目黒信一郎氏(元・古河電気工業㈱)

「超伝導材料の開発を中心とする加速器科学への開拓的貢献」

- 西川賞

FPGAを用いた高機能 bunch-by-bunch フィードバックシステムの開発研究

(公財) 高輝度光科学研究センター 加速器部門

中村 剛、小林 和生

1. Bunch-by-bunch フィードバックとビーム不安定性

蓄積リングにおいて、蓄積電流やバンチ電流を増 達すると、ビームが発生する電磁場と環境との相 互作用が強まって、ビーム自らベータトロン振動 やシンクロトロン振動を励起するビーム不安定 性が問題となり、ビームの品質の劣化や、リング の運転条件に対して強い制限をもたらす。このよ うな不安定性をアクティブに抑制することによ り、大電流でも運転条件に制限を加えず安定な運 転を可能とする装置が、Bunch-by-bunch フィー ドバックシステム (BBF、Fig. 1)である。BBFで は、ビーム位置モニタ(BPM)からの位置信号を用 いて、各バンチの位置を検出し、それに信号処理 を施して振動の減衰に必要なキック量を計算し、 キッカーを駆動して、振動を高速に減衰させてい る。



Fig. 1: SPring-8 の Bunch-by-bunch フィードバック装置(BBF)の概念図。SPring-8 では、508MS/s(2ns のバンチ間隔)のデータレートで処理を行なっている。

SPring-8 では、水平や垂直方向のベータトロン振動に対して、マルチバンチ不安定性の発生が観測されている。マルチバンチ不安定性は、多数のバンチが結合・協力して発生する不安定性であり、強さは平均電流に比例する。これを引き起こしているのは、挿入光源と、RF加速空洞であり、挿入光源では、その磁石列の上下間のギャップが、短周期かつ強磁場を発生するため数 mm と非常に狭いことにより壁面とビームとの相互作用が強まり、壁抵抗不安定性を引き起こしている。また、RF 加速空洞では、ベータ関数が電子光学系の放射光利用への最適化に伴い増大し、空洞の高次モードによる水平方向の不安定性を生じている。

このような、ベータトロン振動の不安定性に対しては、SPring-8のように強いクロマティシティによる不安定性強度の緩和や、KEK Photon Factory のように八極磁石による抑制などが行われていたが、それらは副作用としてリングの安定領域を狭め、随時入射による蓄積電流一定を目指した top-up 運転に必須である高い入射効率の実現を困難とし、さらにビームの Touschek 寿命の低下を引き起こす。

このような不安定性に伴う問題は、どの放射光リングにおいても共通のものとなっており、それを解決する手段としての BBF による不安定性抑制は、現在、多くの放射光リングにおいて必須となっている。

2. FPGA を用いた信号処理装置

SPring-8 では、2002年ごろ、top-up 運転の実現を目指してBBFの開発を開始した。BBFの中核となる装置は、ターン毎の位置データからキック量を計算する信号処理装置であり、当時は、それまでのアナログ処理装置から、デジタル処理装置に移行しつつある時期であった。デジタル処理装置は、BPMからの位置信号を、ADCによりデジタル化してバンチ毎、ターン毎に保持し、各バンチに対して、そのターン毎の位置データをデジタル信号処理し、バンチ毎のキック力のデータを得る装置である。デジタル処理に用いられているフ

ィルタを Fig. 2 に示す。ターン毎のデータ N 個を用いるものを N-tap FIR フィルタと呼んでいる。

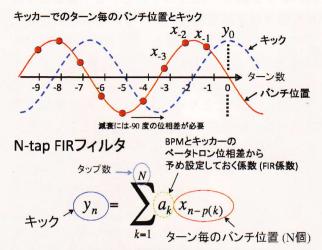


Fig. 2: デジタル信号処理に用いている N-tap FIR フィルタ。上: キッカーにおけるターン毎の位置と、減衰に必要なキックの位相関係。キック力は、キッカーにおいて、バンチ位置から-90 度ずれている必要がある。下: このようなキックを、ターン毎の位置 N 個から生成するための N-tap FIR フィルタ。FIR フィルタの入出力の位相差は、上記の-90 度に、BPM からキッカーまでの位相差を加えたものとなる。

ボジタル装置は、アナログ装置に比べてその構成の単純さによる設置・調整の容易さや、信号処理の柔軟性から、SPring-8においてもまず候補として挙がった。しかし、当時は、SPring-8のような~500MHzのバンチレート(~500MS/sのデータレート)に対応可能なデジタル処理装置として、2-tap FIR フィルタを実装したカスタム ICによる KEKBの装置[1]や、5-tap FIR フィルタが実行可能な、ELETTRAと SLSにより共同開発された多数個の DSPを並列化した大規模かつ高価な装置[2](Fig. 3上)が稼働しているのみであった。我々は、その処理能力や柔軟性から、後者のものを SPring-8 へ導入することを検討したが、費用や作業量が膨大となること、そして、ADCの分解能が 8-bit であり、SPring-8には精度が不足

していると考えられたことから、これに変わるシ ステムを検討することとした。

このような状況に対して、当時、新しいデジタ ル信号処理用のデバイスとして、FPGA が立ち上 がりつつあった。FPGAは、現場で(Field)、動作 プログラムを変更可能な(Programmable)、ハー ドウェアロジック回路(Gate Array)であり、BBF の信号処理のように、条件分岐 (if 文等) を必要 としないプログラムでは、ハードウェアの持つ高 速性・並列性を発揮すると期待された。そこで、 まず予備試験として、最大サンプリングレートが 125MS/s の 12-bit ADC および、FPGA、DAC を 搭載した市販ボードを入手して、フィードバック システムを部分的に開発しビーム試験を実施し たところ、十分な性能が得られた。しかし、当時 は 12-bit の分解能で 508MS/s に対応可能な ADC は存在しなかったため、このボードを複数台 もちいて並列化することにより12-bitの分解能で 508MS/s を実現した試作機を、2003年に製作し、 2004年当初より利用運転に投入した[3]。

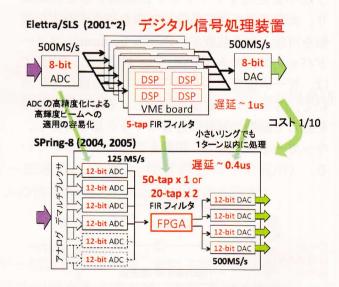


Fig. 3: デジタル信号処理装置。それまでの DSP を用いた装置(上)と、SPring-8 で開発した FPGA を用いた装置 (実用機)(下)。

試作機では 508MS/s のデータレートの位置信号を、アナログ段で 6 分岐して、85MS/s で駆動される 6 台のボードに導き、互いに異なるバンチ

をサンプルすることにより並列化し、最後にそれをカスタム製作した FPGA を用いたデマルチプレクサにより 508MS/s に再構成している。FPGA は性能/価格比や、性能/サイズ比が非常に高く、これまでの DSP を用いたシステムに比べてコスト、サイズを大きく低減することが可能となった。さらに、2005年には試作機では7台の FPGA を用いていたところを1台の FPGA のみですべての処理を行うことにより1ユニット化した実用機[4] (Fig. 3下)を開発し、調整点数、コストをさらに低減することが可能となった。

実用機では、FPGA の処理能力により、

- * 20-tap FIR フィルタが実行可能 これにより高度な信号処理が可能となった。 従来の DSP を用いたシステムでは、5-tap FIR フィルタが最大であった。
- *ADC 入力から DAC 出力までの遅延を低減 DSP に比べて半減したので、小さいリングでも1ターン以内に信号処理が可能となり、フィードバックの特性が向上する。
- の特徴をもつことが可能となった。 また、この信号処理装置を用いて、以下のよう な新手法を開発した。
- *20-tap FIR フィルタの設計方法[3] 多数の自由度に対応可能であり、かつ低ノイ ズ化が可能な計算方法を開発
- *BPM からの RF 信号の直接サンプリング[5] 本装置では、高いアナログ帯域を持つ ADC を採用することにより、BPM からの RF 信号を直接サンプリングする手法を開発した (Fig. 4)。従来は、RF 信号を低周波へ変換したのち ADC によりサンプリングしていたため、変換回路が必要であったが、この手法によりそれが不要となり、アナログ部の構成機器数およびそれに伴う調整点数やコストを大幅に削減した。
- * 20 ターンの情報を用いることによる水平・垂直 を 1 ループで抑制[6]

BPM からの1つの信号、一本のキッカー電極、1台の信号処理装置による2次元フィードバックを実現した(Fig. 5)。これは、

20-tap の FIR フィルタを用いて、信号処理 を、水平・垂直の周波数に対して独立に行う ことにより可能となった。これにより機器点 数を半減することが可能である。

また、BBF の周辺装置としては、以下を開発した。
* BPM のノイズによるビーム振動の発生の解析
およびそれに基づく高精度 BPM の導入[7.8]

BPM のノイズ(位置精度)は、フィードバックを通過して、キッカーを駆動し、ビームを振動させる。特に SPring-8 では、垂直方向のビームサイズが、数 μm と小さい上に、マルチバンチ運転時のバンチ電流が他のリングに比べて小さく、また、ビームパイプが大きいため BPM は低感度となっていた。そのため、振動振幅をビームサイズより一桁小さくするために必要な BPM の精度を解析により求め、それ満たす高精度 BPM を開発し導入した。

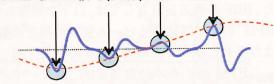
* BPM の RF 信号から、必要なバンチの信号を切り出すことが可能なマルチプレクサ[3]

高いバンチレートのビームでは、低周波に 変換しても ADC のアナログ帯域以上の信号 となるような場合が生じるがそのような場 合にも対応可能とした。

開発された信号処理装置や手法は、SPring-8 と同様な問題を抱えていた KEK の Photon Factory[6,9]、台湾のTLS[10,11]、中国のHLS[12] や SSRF、フランスの SOLEIL[13,14]、韓国の PLS/PLS-II の放射光リングとの共同研究に発展 し、それらのリングにおいて信号処理装置として 採用された。また、イオンリングにおいても、KEK PS においてバンチの内部振動抑制による head-tail 不安定性の抑制を実現し[15]、また、京 大S-LSR におけるコースティングビームの不安定 性抑制[16]、そしてそれらの技術を基にした 放医 研 HIMAC での冷却されたイオンビームの不安定 性抑制[17]に成功した。さらに、ESRF や APS[18,19]での信号処理装置の開発に対して協 力を行った。我々の装置に数年遅れて FPGA を用 いた他のシステムがいくつか立ち上がっている が、12-bit の高精度 ADC を用いたものは、どれ

もが、SPring-8 の装置と同等の手法を用いていた。

BPMからのRF信号(実線)の瞬時値をサンプル



従来は、破線に周波数変換した後、サンプル

Fig. 4: BPM の RF 信号(実線)の直接 ADC サンプリング。バンチの位置は実線のピーク値に比例しているので、それを広アナログ帯域の ADC により直接サンプルする(矢印はサンプリングタイミング)。従来は、破線のベースバンド信号に周波数変換してからサンプリングを行なっていた。

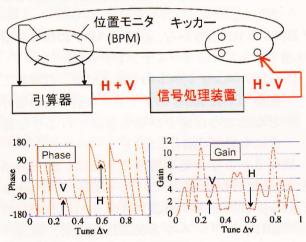


Fig. 5: 1ループ水平垂直 2 次元フィードバック。BPM(位置モニタ)からの一本の信号に含まれる水平・垂直の情報を信号処理装置において、水平および垂直の振動を、チューン(周波数)で切り分けて処理し、キッカーの 2 方向へのキック力に対して最適なキックを計算する。下は、20-tap FIRフィルタのチューンに対する応答例[6]であり、H,Vの矢印は、それぞれ水平、垂直のチューンの位置を示している。20-tap を用いることによりチューン以外でのゲインを抑制しながら、H、Vそれぞれのチューンで、位相、ゲインの最適化が可能となっている。

3. 最近の進展

放射光リングにおいては利用手法に応じて各種のフィリングが要求されるが、大バンチ電流の孤立バンチと、低バンチ電流のバンチトレインとを共存させたハイブリッドフィリング (Fig. 6)は、孤立バンチを用いた時間領域での利用と高デューティーを必要とする利用との両立が可能であるので、近年、その要求が高まり、2012年より、5mA/bunchの大バンチ電流の孤立バンチを持つハイブリッドフィリングの利用運転を開始している。

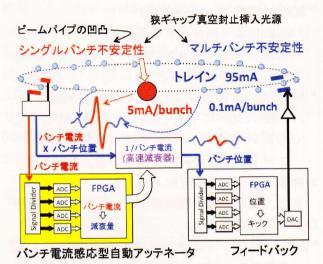


Fig. 6: 大電流バンチと低バンチ電流のトレイン からなる、バンチ電流の差が大きいフィリングに 対して、大電流バンチの信号を自動アッテネータ により減衰させ信号レベルを最適化することに より対応する BBF システム。数十倍のバンチ電流比に対応可能である。

しかし、このフィリングでは、孤立バンチに対しては、大バンチ電流に伴う強いシングルバンチ不安定性、そして、バンチトレインに対しては、大きな平均電流が引き起こすマルチバンチ不安定性の、両方の不安定性を BBF により同時に抑制する必要がある。しかし、BPM からの位置信号はバンチの位置とバンチ電流の双方に比例するので、大電流バンチは非常に強い BPM 信号を発生し、それにより BBF が飽和してしまう。そのため、そのままではシングルバンチ不安定性の

13が困難である。そこで、個々のバンチに対してそのバンチ電流をリアルタイム測定し、それに下してBPM 信号を減衰させて、飽和を除去するシステム(バンチ電流感応型自動アッテネータ)を、信号処理装置を基に新たに数十倍のバンチ電流比に対応できるシステムとして開発した「20](Fig.6)。これを、それまでもちいていた数倍のバンチ電流比に対応していた簡単な自動アッテネータシステム[21]と置き換え、バンチ電流に大きな差がある状況においても、大電流孤立バンチと、低バンチ電流トレインの両方の不安定性を抑制し、かつ、種々のフィリングに対する BBF 調整の自動化を進めることに成功した。

4. 今後の展開

夏在(2013年)、新しい信号処理装置を開発している。その目的の一つは、Fig. 6のシステムの統合であり、一台の装置に自動アッテネータおよびフィードバックの両方の機能を持たせ、システムの 電路化を図り、設置・調整の容易さを実現する。

もう一つの目的は、新しいフィードバック手法の適用である。現状では、シングルバンチ部の電流は、シングルバンチ不安定性により 5mA/bunchに制限されている。これは、フィードバックのゲイン(減衰力)が、現在用いているフィードバック手法の安定性の理論的な限界に近づいているためであり、これ以上のゲインではフィードバック自身がビームを不安定化させてしまう。そこで、これを克服した、そして、10mA/bunch さらには20mA/bunchのバンチ電流の蓄積を目指した、新しいフィードバック手法をいくつか検討しており、新しい信号処理装置は、新手法の適用を考慮したものとなっている。2013年度には、この新処理装置を完成させて利用運転に投入し、さらには、新手法の開発に入りたいと考えている。

最後に、御支援、御協力を賜りました多くの共 同研究者および協力者の皆様に感謝いたします。

参考文献

[1] M. Tobiyama and E. Kikutani, "Development of a high-speed digital signal process system for

bunch-by-bunch feedback system", Phys. Rev. ST Accel. Beams 3, 012801 (2000),

http://prst-ab.aps.org/pdf/PRSTAB/v3/i1/e012801

[2] D. Bulfone, C. J. Bocchetta, R. Bressanutti, A. Carniel, G. Cautero, A. Fabris, A. Gambitta, D. Giuressi, G. Loda, M. Lonza, F. Mazzolini, G. Mian, N. Pangos, R. Sergo, V. Smaluk, R. Tommasini, L. Tosi, L. Zambon, M. Dehler, and R. Ursic, "First Commissioning Results of the ELETTRA Transverse Multi-bunch Feedback", Proc. of DIPAC01 (2001),

http://accelconf.web.cern.ch/Accelconf/d01/papers/CT 02.pdf

[3] T. Nakamura, S. Date, K. Kobayashi and T. Ohshima, "Transverse Bunch-by-bunch Feedback System for the SPring-8 Storage Ring", Proc. of EPAC04 (2004),

http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e04/PAPERS/THPLT068.pdf .

[4] T. Nakamura and K. Kobayashi, "FPGA Based Bunch-by-bunch Feedback Signal Processor", Proc. of ICALEPCS05 (2005),

 $http://accelConf.web.cern.ch/AccelConf/ica05/proceed ings/pdf/P3_022.pdf$

[5] T. Nakamura, K. Kobayashi, and Z. Zhou ", Bunch-by-bunch Feedback by RF Direct Sampling", THPC128, Proc. of EPAC08 (2008),

http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e08/papers/thpc128.pdf.

[6] T. Nakamura, K. Kobayashi, W.X. Cheng, T. Honda, M. Izawa, T. Obina and M. Tadano, "Single-Loop Two-Dimensional Transverse Feedback for Photon Factory", Proc. of EPAC06 (2006),

 $\label{lem:http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e06/PAPERS/T HPCH092.PDF} .$

[7] T. Nakamura, "Residual Beam Motion Driven by the Noise at Transverse Feedback", Proc. of

NANOBEAM05 (2005), Proceedings of official site of NANOBEAM2005 had gone, refer

http://beam.spring8.or.jp/nakamura/papers/Nanobeam05/proc-WG3b-12.pdf

[8] T. Nakamura, "Beam Position Monitor and Kicker for the SPring-8 Transverse Bunch-by-bunch Feedback", Proc. of DIPAC05 (2005),

http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/d05/PAPERS/P OW027.PDF

[9] W.X. Cheng, T. Obina, T. Honda, M. Izawa, M. Tadano, M. Tobiyama, T. Nakamura and K. Kobayashi, et, al, "Bunch-by-bunch Feedback for the Photon Factory Storage Ring", Proc. of EPAC06 (2006),

http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e06/PAPERS/T HPCH093.PDF

[10] K.H. Hu, C.H. Kuo, P.J. Chou, Demi Lee, S.Y. Hsu, Jenny Chen, C.J. Wang, K.T. Hsu, K. Kobayashi and T. Nakamura, et. al, "Commissioning of the Digital Transverse Bunch-by-bunch Feedback System for the TLS", Proc. of EPAC06,

http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e06/PAPERS/T HPCH097.PDF

[11] C.H. Kuo, W.K. Lau, M.S. Yeh, K.H. Hu, Demi Lee, M.H. Wang, P.J. Chou, S.Y. Hsu, Jenny Chen, C.J. Wang, K.T. Hsu, K. Kobayashi, T. Nakamura and M. Dehler, "FPGA-Based Longitudinal Bunch-by-bunch Feedback System for TLS", Proc. of EPAC06 (2006),

http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/e06/PAPERS/TH PCH098.PDF

[12] Z. R. Zhou, J.H. Wang, B.G. Sun, L. Wang, M. Meng, Y.L. Yang, Y.B. Chen, T. Nakamura, and K. Kobayashi, "COMMISSIONING OF THE DIGITAL TRANSVERSE BUNCH-BY-BUNCH FEEDBACK SYSTEM FOR THE HLS", TH6REP084, Proc. of PAC09 (2009),

 $http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/PAC2009/papers/t\\ h6rep084.pdf\ .$

[13] R. Nagaoka, L. Cassinari, M. Diop, J.M. Filhol, M.P. Lvel, A. Loulergue, C. Mariette, R. Sreedharan, T. Nakamura and K. Kobayashi, "Operational Status of the Transverse Bunch-by-bunch Feedback System at SOLEIL", WEPEB029, Proc. of IPAC10 (2010),

http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC10/papers/wepeb029.pdf.

[14] R. Nagaoka, L. Cassinari, J.C. Denard, J.M. Filhol, N. Hubert, M.P. Level, P. Marchand, T. Nakamura and K. Kobayashi, "Transverse Feedback Development at SOLEIL", MOPAN009, Proc. of PAC07 (2007), http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/p07/PAPERS/MOPAN009.PDF

[15] T. Toyama, S. Igarashi, T. Obina, T. Miura, T. Nakamura and K. Kobayashi, "Transverse Feedback Damper at the KEK-PS MR", Proc. of 3rd Annual Meeting of PASJ (2006),

 $\label{lem:http://www.pasj.jp/web_publish/pasj3_lam31/Proceeding} $$ s/T/TP57.pdf .$

[16] T. Nakamura, K. Kobayashi, T. Shirai, S. Fujimoto, A. Noda, T. Toyama, S. Shibuya, and K. Torikai, "Digital Feedback for Transverse Coasting Beam Instability at S-LSR", Proc. of 3rd Annual Meeting of PASJ (2006), http://www.pasj.jp/web_publish/pasj3_lam31/Proceeding s/T/TP56.pdf.

[17] T. Shirai, K. Mizushima, S. Ojima, T. Furukawa, Y. Iwata, M. Kanazawa, K. Noda, S. Shibuya, K. Torikai, T. Nakamura, and K. Kobayashi, "Fast Extraction of Electron-Cooled Ion Beam at HIMAC", Proc. of the 5th Annual Meeting of PASJ (2008),

http://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_lam33/contents/P DF/WP/WP050.pdf

[18] C.-Y. Yao, E. Norum, and N. DiMonte, "An FPGA-Based Bunch-by-bunch Feedback System at the Advanced Photon Source", Proc. of PAC07 (2007),

http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/p07/PAPERS/MO PAN116.PDF

[19] C.-Y. Yao, V. Sajaev and N. Di Monte, "Recent Progress of the Bunch-by-bunch Feedback System at the Advanced Photon Source", Proc. of IPAC10 (2010),

http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC10/papers/wepeb049.pdf

[20] K. Kobayashi and T. Nakamura, "New Automatic Bunch Current Sensitive Fast Attenuator for RF Front-End of Bunch-by-bunch Feedback System at SPring-8", Proc. of ICALEPCS09 (2009),

http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/icalepcs 2009/papers/thb006.pdf

[21] T. Nakamura, T. Fujita, K. Fukami, K. Kobayashi, C. Mitsuda, M. Oishi, S. Sasaki, M. Shoji, K.Soutome, M. Takao and Y. Taniuchi, and Z. Zhou," Filling of High Current Singlet and Train of Low Bunch Current in SPring-8 Storage Ring", Proc. of EPAC08 (2008),

 $http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e08/papers/thpc1\\27.pdf$

·西川賞

KEK低速陽電子ビームの強度増強とその 応用に関する研究

高エネルギー加速器研究機構(KEK) 物質構造科学研究所

和田 健

1. 研究の概要

電子線形加速器(リニアック)で 10 MeV 程度以上に加速した電子ビームを、タンタル (Ta) 等の重金属に照射すると制動放射が出るが、それが同じ金属内で電子・陽電子対生成をする。これに用いる重金属のことを陽電子コンバータと呼ぶ。対生成した陽電子は、入射電子ビームエネルギー付近までの広いエネルギー分布を持つが、陽電子に対する仕事関数が負であるタングステン (W) 等の薄膜 (モデレータ) を用いることで、それを単色化することができる。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所の低速陽電子実験施設では、この単色化した陽電子を任意のエネルギーに加速し、可変エネルギー単色陽電子ビーム (低速陽電子ビーム) として物性研究に用いている。

本研究では、KEK 低速陽電子実験施設の既存のコンバータ/モデレータを改良し、以前よりも10 倍の低速陽電子ビーム強度を得ることに成功した [1]。これにより、東京理科大学長嶋グループによるポジトロニウム負イオンの光脱離を応用した可変エネルギーポジトロニウムビーム生成 [2]、原研高崎河裾グループによる反射高速陽電子回折実験での Si(111)-7x7 最表面原子層のみからの明瞭な回折像の観測 [3] (いずれも当施設との共同研究) などが可能となった。

2. 陽電子生成法と陽電子による物質研究

陽電子は電子の反粒子で、物質中に入射すると、 やがて電子と対消滅してγ線になる。対消滅は、 電子と陽電子の相互作用の中では断面積の小さ な過程であり、電子励起、フォノン励起等の方が 遙かに大きな断面積をもっているので、ほとんど の対消滅は陽電子が熱化してから起きる。その対 消滅γ線には、陽電子が対消滅する相手の電子状 態の情報が反映されているので、それを詳しく調 べることで、例えば半導体や金属内の格子欠陥、 合金中のナノ析出物、機能性分離膜や多孔性材料 の孔などの情報を得ることができる。また、医療 分野では、がんの診断に陽電子放出断層撮影 (positron emission tomography, PET) が用いら れている。

陽電子をつくる方法はいくつかある。ひとつは、 22 Na などの 8 + 崩壊をする放射性同位元素 (RI) を用いる方法である。もうひとつは、高エネルギー光子からの陽電子電子対生成を用いる方法である。1 節で述べたリニアックからの高エネルギー電子ビームを用いて陽電子を得るのがその例である。また最近は、原子炉からの 9 線、もしくは原子炉からの熱中性子によって起こる核反応 113 Cd(113 Cd(113 Cd) からの 114 Cd からの 113 R能子対生成も利用されている。

上記のいずれの方法でも、得られる陽電子は広いエネルギー分布(白色)を持つ。RIからの陽電子は白色のまま物質研究に用いられることが多いが、KEKの低速陽電子実験施設ではリニアックによって生成した陽電子を単色化し、0.1~35 keVの任意のエネルギーに再加速して実験に用いている。これにより、試料への陽電子の打ち込み深さを制御できる他、陽電子を用いた回折実験などにも利用することができる。

KEK 低速陽電子実験施設のコンバー タ/モデレータの改良

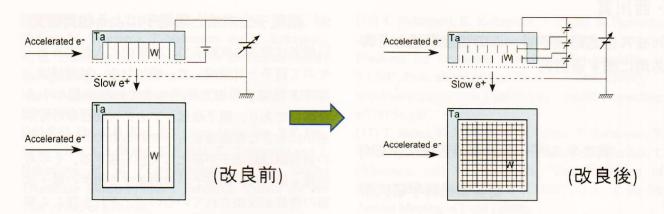


図 1: KEK 低速陽電子実験施設の陽電子生成コンバータ/モデレータの概念図。改良前(左)と改良後(右)のそれぞれの上面図と側面図が示してある。

広いエネルギー分布を持つ陽電子は、陽電子独特の方法で単色化することができる。陽電子に対して負の仕事関数を持つ物質(W, Ni, Cu など)が存在し、これらの物質に陽電子が入射すると、表面付近で熱化した陽電子の1部が、負の仕事関数で決まる1~数eV程度に単色化されて自発的に再放出される。この陽電子の熱化・再放出による単色化のための装置をモデレータと呼ぶ。

2010 年 4 月当時の KEK 低速陽電子実験施設のコンバータ/モデレータの概念図を図 1 左に示す。図の上側が上面図で、下側が側面図である。厚さ $25~\mu$ m の短冊状のタングステン (W) 薄膜 7 枚 (モデレータ) が、リニアックからの電子ビームの入射方向に対して垂直に配置されていた。また、最大 35~kV に昇圧されるコンバータとモデレータに対して、9~V 乾電池を用いて引き出しグリッドに相対的に電圧がかけられていた。

これを改良するために、まずは、入射電子ビームと W 薄膜が平行になるよう、モデレータを90 度回転することを検討した。コンバータで対生成した高エネルギーの陽電子は、角度広がりをもってモデレータ側に入射するが、なるべく低視射角で W 薄膜に入射した方が再放出陽電子の量が増える(変換効率が高まる)と考えられる。金属中で熱化した陽電子は、消滅の前に半径およそ 100 nm ほどの範囲に拡散するので、おおまかに、W 薄膜表面から 100 nm よりも浅い領域で熱化した陽電子が表面から再放出され得る。高速

の陽電子は、垂直入射よりも、低視射角で入射した方が W 薄膜表面近傍で熱化する量が増えるため、その方が再放出陽電子の量は増大する。

ただし、何らかの理由で新しい配置の W 薄膜がうまく機能しなかった場合のことも考え、少なくとも従来の低速陽電子強度を確保するよう、改良前と同様の向きに配置した W 薄膜も残すことにした。コンバータ/モデレータの交換作業の機会は通常は年に1度(夏の停止期間)しかなく、万が一失敗した時の共同利用への影響は甚大であるので、慎重を期した。(コンバータ/モデレータを含むリニアック全体はコンクリートシールドに覆われているが、それを交換するためには、シールドを比較的大規模に開けて KEK-B 用のメインリニアックのトンネルに仮置きする必要があり、その機会は年に1度しかない。)

また、モデレータは 2 セット用意し、高圧フローティング電源を新たに導入して、図 1 右に示すように、最大 35 kV に昇圧するコンバータに対して、1 段目のモデレータ、2 段目のモデレータ、引き出しグリッドにそれぞれ最大 -10 V の相対電圧がかけられるようにした。

入射電子に対して垂直と平行に W 薄膜を配置するために、W 薄膜を井桁状に組み上げた。図 2 に示すように、厚さ $25~\mu$ m の短冊状の W 薄膜にレーザー加工により幅 $30~\mu$ m の切り込みを入れ、その切り込み同士はめあわせるよう薄膜を組み上げた。井桁に組み上げた後は、図 2 にお

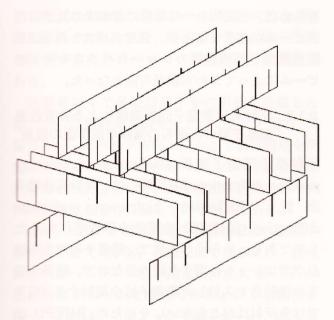


図 3: 井桁状のモデレータの組み上げ方

いて下方からはめ込むように描いた2つの短冊の うちのどちらかをピンセットで軽く持ち上げて アルミホイル等を差し込んでその上にのせるな どして、井桁全体を崩さずに移動することができ るようにした。

使用した電子ビーム溶接機の到達真空度は、 Torr であるが、この真空度における酸素の分圧 は W 薄膜モデレータの熱処理には丁度良いと 考えられる。熱処理により W 表面には炭素が析 出し、それが陽電子の再放出を阻害するが、それ を除去するのに、酸素がある程度含まれていた方 が良い。

井桁状のモデレータを平らに置くと、溶接機の 電子ビームは W 薄膜に対して平行に入射する

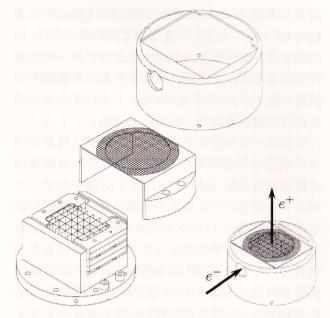


図 2: 改造後のコンバータ/モデレータの図。

ため、うまく加熱できない恐れがある。このため、モデレータを入れる箱状の容器を厚さ 50 μ m の W 薄膜で作り、その中にモデレータを納めた後、箱と同じ厚みの W 薄膜で作ったフタをして、そのフタに電子ビームを照射してその放射熱でモデレータを温めることにした。このようにすることで、加熱後にモデレータが変形して装置のモデレータ用ホルダに入らなくなることも防ぐことができる。

溶接機本来の目的の溶接処理時には、電子ビームを十分収束させて使用するが、モデレータの熱処理時にはビーム径を広げ、モデレータ1セットにつき 11 分から 13 分かけて全体をスキャンした。スキャンは、モデレータをのせた X-Y ステージを動かすことで行なった。

熱処理の温度測定は、通常は放射温度計を用いるが、使用した電子ビーム溶接機の窓は鉛ガラスでしかも内側表面が汚れており、その窓を通した正確な温度計測が難しい。時間的な制約もあり、ニオブ(Nb,融点 2477°C)が溶ける条件から、およそ $2400\sim2500$ °C 程度になるようビームパラメータを決めた。なお、使用した電子ビーム溶接機は融点 3422°C の W を簡単に溶かす能力がある(ビームパワーの規格値は 6 kW)。実際に

使用したビームパワーは 192 W (120 kV, 1.6 mA) で、他の方法よりも高温で熱処理できた。

図 3 に、改良後のコンバータとモデレータの実際の図を示す。これが、内部を冷却水が循環する 銅製の熱アブソーバーにマウントされ、チャンバー内部に組込まれる。

コンバータ/モデレータの改良前後で、同じビームの輸送パラメータで、低速陽電子ビーム強度の比較を行なった [1]。ビームライン途中のゲートバルブを閉じ、そこからの消滅 γ 線を、BGO シンチレータをマウントした光電子増倍管で検出し、その出力信号をオシロスコープで観測した。改良前のピーク波高 55 mV に対し、改良後は575 mV となり、ビーム強度は 10 倍以上増えた。1段目と2段目のモデレータのフローティング電源のON と OFF で、ビーム強度は 1.6 倍異なり、モデレータ形状とその熱処理方法の改良による変換効率への効果は、改良前と比較して 6 倍程度であると見積られる。

得られたビーム強度は、パルス幅 $1.2~\mu s$ のロングパルスモードで $5\times 10^7~slow~e^+/s$ である (繰り返し周期は 50~Hz)。これは、ミュンヘンエ科大学 (独) の原子炉ベースの低速陽電子ビーム (現在停止中) に次ぐ世界第2位の強度である。

3.1. 低速陽電子ビーム強度が増大したことによって可能となった共同利用の成果

3.1.1. 可変エネルギーポジトロニウムビーム

東京理科大学の長嶋泰之教授の研究グループが、 アルカリ金属を蒸着したタングステン表面に低速陽電子ビームを入射すると、表面からポジトロニウム負イオン (陽電子1つと電子2つの束縛状態) が大量に放出されることを、同大学に設置した RI ベースの低速陽電子ビーム装置を使って発見した [4]。これを応用し、電荷を持つポジトロニウム負イオンを電場で加速した後に、Nd:YAG レーザーの基本波を照射して電子1つを剥ぎ取り [5]、0.3 kV から2.3 kV の可変エネルギーのポジトロニウムビームを得ることにKEK の低速陽電子実験施設で成功した[6](長嶋研究室と当施設の共同研究)。十分な計数率を得 るために、空間的かつ時間的に高密度の低速陽電子ビームが必要となるが、強度が増大した KEK 低速陽電子実験施設のショートパルスモードのビームによってこの実験が可能となった。

3.1.2. 反射高速陽電子回折実験による物質最表 面原子層のみからの明瞭な回折像の観測

反射高速陽電子回折(Reflection high-energy positron diffraction, RHEPD)は、反射高速電子回折(Reflection high-energy electron diffraction, RHEED)の電子を陽電子にかえたものである。あらゆる物質で、陽電子に対する結晶ポテンシャルは電子と逆の正なので、臨界角以下の視射角で入射した陽電子は全反射する(電子では全反射はおこらない)。そのため、RHEPDは物質最表面に非常に敏感である。RHEPDは名古屋大学の一宮彪彦によって提唱され[7]、原研高崎の河裾厚男と岡田漱平によって、22Naベースの低速陽電子ビームによって実現化された[8]。

KEK の低速陽電子実験施設のビーム強度が、 本研究により 1 桁増大した後、原研高崎の RHEPD 装置を KEK に導入した [1,9]。エネル ギー 15 keV で磁場輸送されてくる陽電子を、非 磁場領域に開放した後に、透過型の輝度増強ユニ ットに導入する。保存場中でビームの輝度(ここ では、位相空間を占める陽電子の「体積」あたり のビーム強度と定義する) はリュービルの定理に より一定であるが、輝度増強ユニットでは非保存 場を用いてビームの輝度をあげることができる。 厚さ 100 nm の W 薄膜上に磁気レンズで陽電 子ビームを収束させ、非保存場の W 薄膜中で陽 電子は熱化された後、その一部が入射時とほぼ同 じビーム径のまま薄膜の反対側から再放出され る。それを 10 keV に再加速し、接地電位の試料 に入射する。これによりビームの輝度は、約3桁 増大した。回折像の計数率については、原研高崎 の ²²Na ベースのビームと比較して 60 倍程度増 えた。この装置を用い、Si(111)-7x7 表面からの 回折像を観測した [3]。10 keV で陽電子を Si に 入射した場合の臨界角は 2.0° (視射角) である が、臨界角以下の入射条件で、物質最表面原子層 からのみの明瞭な回折像を得ることに初めて成 功した。これは他の量子ビームには不可能な画期的な成果である。現在、回折像から直接原子位置を決定するためのパターソン解析法を整備中である。

臨界角以下で最表面原子層の構造を決定した 後、さらに視射角を増やしていくと、2 層目、3 層目、…、とバルク方向へ向かって順次構造を決 定してくこともできる。我々は、この手法を全反 射陽電子回折と名付け、表面構造解析のための共 同利用装置として公開していく予定である。

なお、KEK の低速陽電子実験施設は、陽電子 発生部を最大 35 kV の高圧にできるため、接地 電位のビームライン及び測定器に最大 35 kV の 低速陽電子ビームを輸送できるという柔軟性を 持つ。これは、リニアックや原子炉ベースの大規 **模施設としては世界唯一の特徴である。例えば、** 当施設で輝度増強したビームで RHEPD 実験を 行なう場合、低速陽電子発生部からのエネルギー 15 keV のビームを 10 kV に印加した透過型再 減速材に入射した後、エネルギー 10 keV のビー ムとして接地電位の試料に入射している。他の大 規模施設では、低速陽電子発生部は数百 V から 1 kV 程度にしか昇圧できないので、輝度増強し たビームで同様の実験を行なうためには、途中で 陽電子の輸送エネルギーを上げる工夫をするか、 測定器全体を高圧に昇圧する必要がある。

4. まとめと今後の展望

KEK 低速陽電子実験施設において、コンバータ/モデレータを改良し、低速陽電子ビーム強度が10 倍になった。強度が増大した低速陽電子ビームにより、可変エネルギーポジトロニウムビームの生成や、全反射陽電子回折法によるSi(111)-7x7 最表面原子層からのみの明瞭な回折像の取得に成功した。

今後は、全反射陽電子回折法におけるパターソン解析を用いた表面原子位置の直接決定法の開発を原研高崎の河裾グループと共同で進めるとともに、共同利用のための実験ステーションの整備を進めていく。また、開発中の、低速電子回折

(Low-energy electron diffraction, LEED) の陽電子版である低速陽電子回折 (Low-energy positron diffraction, LEPD) 装置では、東大物性研の高橋研究室と共同で、陽電子による表面原子のホログラフィー [10] に挑戦する。

これまで当施設は、50 Hz のパルスビームの特徴を生かした、ポジトロニウム負イオン実験や、ポジトロニウム飛行時間測定実験などを行なってきたが、2013 年度中にビーム DC 化 (陽電子が時間的にばらけた状態にする) のためのセクションをビームライン途中に導入し、DC ビームも供せられるようにする。2014 年度には、DC ビームを利用して、低速陽電子ビームで一般的に行なわれているドップラー広がり測定、同時計測ドップラー広がり測定が高効率できるよう実験ステーションの整備を進め、さらなる共同利用の拡大をはかる予定である。

全反射陽電子回折法は表面構造解析手法として特筆すべきものである。ビームエネルギー数十MeV, ビームパワー 1 kW 程度の小型のリニアックがあれ、当施設と同等の低速陽電子ビームを生成することが可能なので、今後他の施設で広く導入されていくことが期待される。

5. 謝辞

本研究では、多くの方々のご支援ご協力を頂きました。東京理科大長嶋グループ、原研高崎の河裾グループの皆様には、強度が増大した低速陽電子ビームの応用にあたって、一方ならぬご尽力を頂きました。設楽哲夫氏をはじめとする KEK 入射器グループの皆様には、リニアックの保守管理と運転をして頂いた他、普段の研究活動全般にわたってサポートを頂きました。KEK 放管の佐波俊哉氏には、コンバータの適切な厚みを知るためのシミュレーションをして頂いた他、放射線管理全般について助言を頂きました。モデレータの熱処理にあたっては、舟橋義聖氏、井上均氏をはじめとする KEK 機械工学センターの皆様にお世話になりました。フォトンファクトリーの皆様には、共同利用の運用をはじめ、研究活動全般にわ

たってご協力を頂きました。コンバータ/モデレータの改良にあたって、産総研の鈴木良一氏には貴重なアドバイズを頂きました。筆者が大学院時代からお世話になっている兵頭俊夫先生には、ディスカッションや現場での作業を含め、研究全般にわたってご指導を頂きました。ここで全ての方を挙げることはできませんが、その他多くの方々にご支援を頂きました。心よりお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] K. Wada et al., "Increase in the beam intensity of the linac-based slow positron beam and its application at the Slow Positron Facility, KEK", Eur. Phys. J. D66, 37-1-4 (2012).
- [2] K. Michishio et al., "An energy-tunable positronium beam produced using the photodetachment of the positronium negative ion", Appl. Phys. Lett. 100, 254102 (2012).
- [3] K. Wada et al., "New experiment stations at KEK Slow Positron Facility", to be published in J. Phys.: Conf. Ser., 本論文は 投稿準備中.
- [4] Y. Nagashima et al., "Efficient emission of positronium negative ions from Cs deposited W(100) surfaces", New J. Phys., 10, 123029 (2008).
- [5] K. Michishio et al., "Photodetachment of Positronium Negative Ions", Phys. Rev. Lett., 106, 153401 (2011).
- [6] K. Michishio et al., "An energy-tunable positronium beam produced using the photodetachment of the positronium negative ion", Appl. Phys. Lett., 100, 254102 (2012).
- [7] A. Ichimiya, "Reflection high-energy positron diffraction (RHEPD)", Solid State Phenomena, 28&29, 143 (1992/93).

- [8] A Kawasuso and S. Okada, "Reflection high-energy positron diffraction from a Si(111) surface", Phys. Rev. Lett., 81, 2695 (1998).
- [9] I. Mochizuki et al., "Atomic configuration and phase transition of Pt-induced nanowires on a Ge(001) surface studied using scanning tunneling microscopy, reflection high-energy positron diffraction, and angle-resolved photoemission spectroscopy" Phys. Rev. B85, 245438 (2012).
- [10] S. Y. Tong et al, "Low-energy electron and low-energy positron holography", Phys. Rev. Lett. 69, 3654 (1992).

小柴賞

ハードウェアベースの通信制御演算装置を 用いた高速データ収集システムの開発研究

> 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

> > 内田智久

小柴賞をいただいた研究開発課題「ハードウェア ベースの通信制御演算装置を用いた高速データ 収集システムの開発研究」について紹介します。

1. データ収集システムと SiTCP

1.1. データ収集システムの特徴

はじめに加速器科学実験で使用されるデータ収 集システムについて簡単に紹介します。

加速器科学実験では粒子の散乱などを測定します。散乱された粒子の測定は方向だけでなく秘跡も必要になることも少なくありません。そのため多くの検出器を必要とします。また、粒子の損失エネルギーなども測定するため異なる種類の放射線検出器を多数組み合わせて一つの検出器を構築し測定を行います。

近年、実験精度を向上させるために限られた空間に多くの検出器を組み入れて位置分解能を向上させる努力が行われています。また、エネルギーを高い精度で測定するために放射線検出器から出力される波形を精度よく積分する努力も行われており、そのために信号波形をデジタル化する際に短い周期で繰り返しデータを取得しています。これらの理由により検出器に組み込まれる検出器の数と検出器が生成するデータ量は年々増える傾向にあります。

検出器が生成するデータは即時コンピュータへ 送られ記録されたのちに詳細な解析が行われま す ここで説明した検出器が出力する信号を処理してデータを記録するまでのシステムをデータ収集システム(DAQ システム)と呼びます。

DAQ システムを実現するためには限られた空間に配置された数多くの検出器が生成する信号を限られた空間内で処理しデータを検出器外部のコンピュータへ転送して記録する必要があります。

1.2. DAQ システムの装置開発としての側面

DAQ システムを装置開発の側面から見ると性能 以外にも考慮しなければいけない事がいくつか あります。開発期間、構築費用、保守性などです。 これらは一言でコストを下げる必要があるとい えます。

実験競争に勝ち抜き成功させるためには開発期間を出来るだけ短くする必要があります。開発費用が低ければ低いほど実験実現性は高くなります。また、どんなに素晴らしいシステムを構築しても長期運用に耐えることができなければいけませんので高い保守性も必要です。

DAQ システムの役割は検出器で取得した測定データをコンピュータへ転送し記録することですので最後に測定データをコンピュータへ転送する必要があります。従って、コンピュータへデータを転送するためのインターフェースの選択はとても重要になります。

以前は検出器のデータを高速に転送する標準的な方法が無かったので特別な専用インターフェースを用いて転送していました。特別なインターフェースを採用することで要求性能を満たす事ができたのですが、インターフェースが特別なために装置が新しくなると技術の世代交代が必要になり古い装置と接続できなる事もありました。また、近年は実験が長期化する傾向がありますので、実験中に使用していた技術が実験期間中に無くなり保守できなくなる事例も現れました。この

様に特殊なインターフェースを用いるとコスト 面でいくつかの問題が発生します。

コストとコンピュータへデータを転送する事を 考慮するとインターネット技術で大きな発展を 遂げたイーサネットとインターネットプロトコ ル(IP)を採用することは有利になると思われま す。

インターネットの急激な普及により、その中核を担っている IP とイーサネットは大きな発展をしました。データ転送速度は年々指数的に高速化され、多種多様で高性能な IP、イーサネット対応機器が安価で市販されることになりました。これらの機器を DAQ システムに採用できるようにすることは大きな意味があると考えました。

もし、検出器の近くで検出器信号をデジタル化し、そのデジタルデータを IP とイーサネット技術を用いて転送する事が出来たら検出器とコンピュータを直接イーサネットで接続する事になるので先ほどの問題を解決する事ができます。

1.3. ネットワーク化の課題

検出器の近くに配置する読み出し回路で IP とイーサネット技術を採用するためにはいくつかの課題がありました。

実験精度が向上するに従って検出器内は多くの 検出器で満たされるようになりました。検出器が 無い部分はデータが無くなるので、出来るだけ多 くの空間を検出器で覆いたいとのです。これは検 出器信号を処理する回路開発の観点から見ると とても厳しい条件です。検出器の近くに配置する ための条件は次のような要求としてまとめるこ とができます。小型であること、低消費電力動作 であること、高速データ転送できること。

通常 IP はソフトウエアで処理します。これは処理が複雑であり、処理量が非常に大きいからで

す。この為、多くの場合、IP はソフトウエアで処 理されます。

ソフトウエアで処理するためには CPU が必要になります。高速データ転送を実現するためには高速動作可能な CPU を採用しなければいけません。そのような能力を持つ CPU を採用した場合、回路はデスクトップ PC に内蔵されているモジュール程度の大きさが必要になります。形状が大きく、消費電力も大きいので検出器の近くに配置する回路に採用することはできません。この様な事から検出器の近くに配置される回路にネットワークを接続する事が一見不可能に思えました。

そこで、これらの問題を解決するためにハードウェアで IP、イーサネットを処理する回路を開発しました。この回路は SiTCP の名で呼ばれています。正確には SiTCP が処理する通信プロトコルはインターネットで Web ページのデータ転送などで広く使用されている Transmission Control Protocol (TCP)です。TCP は信頼性を持つデータ転送方式です。何らかの問題が発生しデータの一部が届かなかった場合には失った部分のデータを再度転送することでデータを確実に転送する仕組みが組み込まれています。

SiTCP はその特徴により放射線検出器等、センサーの読み出し回路と共に検出器の近くに配置または実装する事ができます。検出器近くに配置された読み出し回路により検出器で取得したデータをイーサネットを使用して直接外部へ引き出すことができるようになりました。

数多くの市販機器はイーサネットと TCP をサポートしていますので様々な市販機器を使用して検出器のデータを処理するシステムを構築することができます。従って、システムを柔軟に構築する事ができるようになりました。

この様に SiTCP を用いると容易に検出器データ を外部へ高速に転送するシステムを構築できる ために多くの実験グループが SiTCP を採用しています。

2. SiTCP

2.1. 概要

SiTCP の開発目的は検出器近くに配置できる検 出器信号読み出しモジュールに搭載し検出器を ネットワーク化する事です。図 1 に SiTCP を用 いた DAQ システムの概念図を示します。

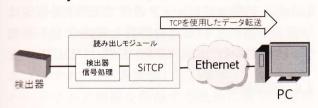


図1 DAQ システムと SiTCP の概念図

検出器が生成するアナログ信号は検出器信号処理回路によりデジタル化され SiTCP へ送られます。SiTCP はデジタルデータをイーサネットとTCP 通信を使用してデータをコンピュータへ転送します。この様に SiTCP と検出器信号処理回路を検出器の近くに配置される読み出しモジュールに搭載する事ができます。

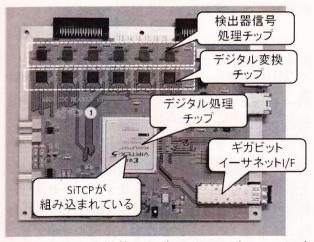


図2 SiTCPを搭載した読み出しモジュール写真

図 2 に SiTCP を搭載した読み出しモジュールの 写真を示します。このモジュールの大きさは縦が 約 150 mm、横が約 200 mm です。このモジュー

ルは Belle-II 検出器の Central Drift Chamber (CDC)の信号を読み出すために製作されたもので す。写真上部にあるコネクタを使用して検出器で ある CDC のセンスワイヤに直接接続します。1 モジュールで 48 チャンネルの信号を処理する事 ができる小型モジュールです。検出器信号は検出 器信号処理チップでアナログ信号処理されたの ちにデジタル変換チップによりデジタル化され ます。デジタル化された信号は回路情報を書き換 える事が可能な半導体チップである Field Programmable Gate Array(FPGA)に入力されま す。FPGA にはデジタル化された検出器信号の処 理を行う回路と SiTCP が組み込まれています。 SiTCP は検出器信号処理回路が処理したデータ をギガビット・イーサネットを使用してコンピュ ータへ転送します。この例のように SiTCP を使 用することで読み出し回路は小型化され汎用通 信インターフェースであるイーサネットを使用 してデータを容易に読み出すことができます。

SITCP は加速器実験で使用する事を想定して設計されています。加速器実験で使用する読み出しモジュールは研究者自ら開発する事も珍しくありません。そこで、電気回路の専門家でなくても容易に使用する事が出来るように SiTCP のユーザーインターフェースはとても単純な方式を採用しています。デジタル回路で一般的に使用される同期 FIFO メモリと同じインターフェースになっています。このインターフェースは特別な手続きなしで送りたいデータを次々に SiTCP へ渡すことができます。

SiTCP は読み出しモジュールから受け取ったデータをコンピュータへ転送しますが、読み出しモジュールに使用するためには他にもモジュールの初期化や動作を決めるためにパラメータを設定する機能が必要です。この機能はスローコントロールと呼ばれています。SiTCP はデータ転送と独立したスローコントロール機能を持っています。スローコントロールは IP の一つである User Datagram Program (UDP)を使用しています。

UDP を使用することでコンピュータから即座に設定を行うことができます。また TCP から完全に独立しているのでコンピュータの制御プログラムも独立に動作させることができます。

SiTCP はこの様な特徴を持っているので検出器の近くに配置する読み出しモジュールに SiTCP を組み組み込むことで遠隔コンピュータヘデータを高速かつ容易に転送が可能になり、遠隔コンピュータから読み出しモジュールを容易に制御することも可能になります。

2.2. 設計方針

1章で IP 処理は複雑で処理量が非常に大きいので通常はソフトウエアで処理すると説明しました。では、何故 SiTCP は IP 処理をハードウエア化することができたのでしょうか。その理由を説明します。

IP とその一部である TCP を処理するためには膨大な処理を行わなければいけません。処理量はソフトウエアで行うか、ハードウエアで行うのか関係ありませんので、何か工夫しなければハードウエア化することは不可能です。

そこで、実験で使用する機能を IP の中から選び 出し、その機能のみハードウエア化する事にしま した。SiTCP を実現させた技術は回路技術ではな く、DAQ システム全体を考慮した仕様の最適化 技術と言えます。

機能を限定することでコンピュータ側の新たなソフトウエア開発などを行うことになっては本来の目的であるコスト削減を達することはできません。そこで、コンピュータから見た場合は通常のデバイスと同じ様にみえる様に工夫がされています。コンピュータ側のプログラムはソケットプログラミングと呼ばれる一般的な手法のみ使用することで開発することができます。特別なパラメータ調整や設定などは不要です。

SiTCP は下のプロロコルのみサポートしています。

- Address Resolution Protocol (ARP)
- Internet Control and Management protocol (ICMP)
- Internet Protocol Version 4 (IPv4)
- Transmission Control Protocol (TCP)
- User Datagram Protocol (UDP)

上記の各プロトコルも機能が制限されています。 しかし、通常コンピュータ通信で使用する機能は サポートされているため特別な設定など不要で データ転送を行うことができます。

2.3. 回路構成

SiTCP の回路構成について説明します。図4が回路ブロック図です。

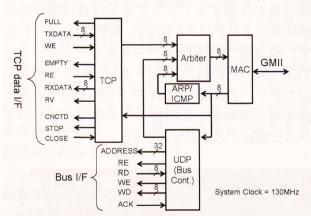


図4 SiTCP のブロック図

ハードウエア処理は処理ごとに専用回路が必要なのでプロトコル毎に専用回路があります。ネットワークプロトコルは階層化されています。階層の低い側は階層が高い処理共通に使われ、階層が上がると機能毎に枝分かれします。イーサネット処理はレイヤ2と呼ばれます。ARP、IP、ICMPはレイヤ3、その他のプロトコルはレイヤ4となります。低位階層となるレイヤ3に相当するイーサネット処理は全てのプロトコルで使用されます。

MAC ブロックはレイヤ2の処理であるイーサネットのフレームを処理します。このブロックではイーサネット規格に適合するようにエラー検出コードの付加、回線速度と回路の処理速度差を吸収するための処理速度緩衝を行います。

ARP/ICMP ブロックは管理用パケットの処理を行います。IP アドレスから MAC アドレスへ変換するために使用する Address Resolution Protocol (ARP)や ping コマンドで知られているエコー機能が含まれている Internet Control Message Protocol (ICMP)のパケット処理を行います。ICMP は多くの機能が規定されていますが、エコーコマンドのみ実装しています。このようにハードウエア規模を削減するために使用頻度が低い機能は実装していません。

TCP ブロックはデータ転送を担う回路であり主回路です。デジタル処理された検出器信号のデータは本ブロックに書き込まれ TCP 規則に従ってコンピュータにデータが転送されます。

UDP ブロックはスローコントロールを担う回路です。スローコントロール回路は UDP を使用していますが、UDP 上に使用されるプロトコルは独自のプロトコルを使用しています。詳細は参考文献を参照してください。

Arbiter ブロックは ARP/ICMP、TCP、UDP ブロックが送信するパケットの調停を行います。優先順位は高い順に ARP/ICMP、UDP、TCP ブロックです。TCP は回線を理論限界値まで使用できるため、TCP パケットの優先順位を上げると他のブロックからのパケットを送信できなくなってしまいます。そこで TCP のパケットの優先順位は最低としています。優先順位をラウンドロビン方式にする方法もありますが、TCP 以外のパケットの使用比率が相対的にとても低いので回路を単純化するために固定優先順位を採用しました。

以上簡単に回路について説明しました。詳細は参 考文献を参照してください。

2.4. 性能測定

市販のコンピュータを接続して転送レートを測 定しました。測定結果を図5に示します。

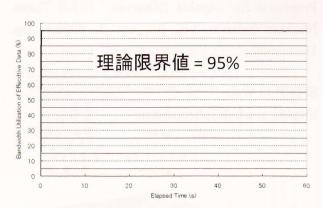


図 5 転送レート測定結果: 横軸は時間、単位は 秒、縦軸は回線使用率、単位は%

イーサネットは 1Gbit/sec が最高転送レートですが、イーサネット、IP および TCP の規格上必要な様々なオーバーヘッドを除くと、ユーザーが使用可能な回線使用率は約 95%になります。測定結果はこの理論限界値に達していてかつ安定した転送を行っていることが分かります。CPU と市販OS を使用すると転送レートの揺らぎが大きくなることが多いのですが、そのような揺らぎは確認できません。

3. まとめ

加速器実験の DAQ システムへの要求性能は年々高くなっていますが、要求を満たすために SiTCP を開発しました。SiTCP は検出器の近くに配置される検出器信号読み出しモジュールに搭載する事を目的に開発しました。SiTCP はハードウエアで IP、イーサネットを処理するので過去のいくつかの問題を解決することに成功しました。 SiTCP を使用すると容易にネットワークを使用した DAQ システムを構築する事が出来るので多くの実験グループで採用されています。今後も多くの

実験グループで使用してもらえるように活動を 続けて行きたいと考えています。

5. 参考文献

SiTCP の論文: T.Uchida, "Hardware-Based TCP Processor for Gigabit Ethernet," IEEE Trans. Nuclear Science. vol. 55, no. 3, 2008.6, pp. 1631-1637.

THE DAY OF THE SECTION AND THE SECTION ASSESSMENT OF THE SECTION ASSES

SiTCP の Web ページ: http://e-sys.kek.jp/tech/sitcp/

* 熊谷賞

超伝導磁石の開発をはじめとする加速器科 学への開拓的貢献

伊藤 進

R今、ご紹介戴きました東芝におりました伊藤で す。

このたび、権威ある熊谷賞を受賞したことは大 変光栄です。ただ、今回の受賞は私一人のもので はなく、現在まで一緒に働いた仲間全員に与えら れたものだと思っています。

ご推薦戴いた諸先生、ならびに関係者皆様に心から御礼申し上げます。

1. はじめに

1.1. 検出器用超伝導電磁石

さて、東芝はセルンのLHCに2種類の超伝導電 ※石をKEKのご指導の下に製作納入しました。

1 つはアトラス実験装置に組み入れられる検出 器用大口径薄型ソレノイド電磁石であり、もう一 つはビーム衝突点におけるビームの直径を絞り 込むための強収束超伝導4極電磁石(MQX)1 6台です。

検出器用超伝導電磁石は宇宙線または衝突したビームから発生した粒子の透過率を高めるために電磁石は出来るだけ薄く、構造材には透過率の高い軽いアルミニュウムを使用するといった特徴があります。

東芝は、検出器用超伝導電磁石として下に示す 様に1989年~1997年にかけて宇宙線観測用PC MG、SSC用SDC、Bファクトリ用Bell e, 更にFermi研究所用Doとたてつづけに 製作致しました。

これらの成果をふまえて、1998年~2001年にかけてアトラス用電磁石の製作をおこないました。この電磁石は内径2.5 m長さ5.3 m厚さ12 mmのアルミニュウム製サポートシリンダーの内側に30 mm×4.3 mmの高強度アルミ安定化超伝導導体をエッジワイズに巻きつける方法が採用されました。そのために特殊な縦型巻き線機を開発し、これを用いて慎重に巻き線作業を行ないました。

完成後の電磁石は工場で定格電流の10%ま しの8400Aの通電テストを行ない健全性を 確認しました。

その後電磁石は2001年にセルンに送られ 現地での各種テスト、計装工事、配管工事等を終 えて2005年に無事アトラス本体に組み込ま れました。

KEK殿向 PCMAG#1, #2 ('89, '92)

気球により打上げ、アメリカ大陸上空で宇宙線観 測を行うために開発された超伝導マグネット

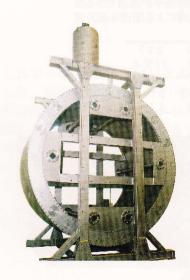
中 心 磁 場 1.21 T 定 格 電 流 520 A 蓄積エネルギー 815 kJ コイルサイズ φ1m×L1.3m クライオスタット アルミハニカム構造 総 質 量 400 kg



KEK殿向 SDC ('93)

薄肉・内巻構造を特徴とした 粒子検出器用超伝導マグネット

中心磁場 1.5 T 定格電流 12000 A コイル 直径 φ3840 mm 長さ 1900 mm



KEK殿向 Belle ('95~'97)

Bファクトリー検出器用 超伝導マグネット

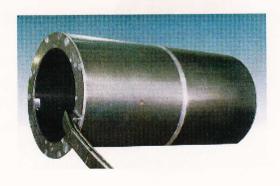
中心磁場 1.5 T コイル 直径 Ø4m 長さ 4.4 m



Fermi研殿向 D0 ('96~'97)

FNALの陽子-反陽子衝突型加速器用 の粒子検出器用超伝導マグネット 衝突の際に生じる粒子が透過できる薄 肉構造で、熱伝導による間接冷却方式 を採用

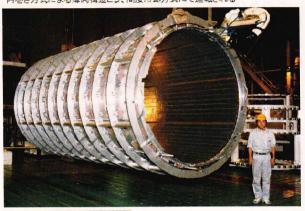
中心 磁場 2.0 T 定格電流 4740 A 蓄積エネルギー 5.2 MJ コイル ボア径 φ1.1m 長さ 2.7 m



この様な軽量化超伝導電磁石の製作技術は、バルーンでの宇宙線観測用超伝導電磁石の製作にも適用されてBESSPolarでは更に軽量化が図られると共に改良も行なわれその結果、ついに2007年に南極大陸で24.5日間の連続フライト、観測実験に成功し大きな成果を挙げました。

KEK/CERN殿向 ATLAS ('98~'01)

IHCのATI AS検出器に組み込まれた薄肉中心ソレノイド超伝導マグネット 内巻き方式による薄肉構造とし、間接冷却方式にて運転される



中心 磁 場 2.0 l 定格電流 7600 A 蓋積エネルギー 39 MJ コイル 内容 2456 mm 長さ 5300 mm 冷却質量 6.0 ton

KEK殿向 BESS Polar #1, #2 ('01~'03)

南極において気球により打上げ、約35km上空で宇宙線観測を行うために 開発された超伝導マグネット



中心 磁場 定格電流 蓄積エネルギー コイルサイズ クライオスタット 総質量

380~476 A 252~395 kJ φ0.9m×L1.4m アルミハニカム構造 410 kg



12 加速器用超伝導電磁石

★に加速器用超伝導電磁石の開発経過について ★ベます。

加速器用超伝導電磁石の製作には、細い超伝導 をより合わせたものを成形したラザーホード ーブルを如何に精度よく鞍形に巻くかと言う きき線技術と電磁石の拘束技術が必要になりま

実は、ここに示します様に1980年半ばにある財団がプロペラの無い船の開発プロジェクト を立ち上げました。

これは超伝導ダイポール電磁石で得られる磁 ると海水に流す電流の相互作用で推進力を得よ っとする計画でした。

この電磁石の製作にあたって自走式巻き線機 っがに電磁石固定用の大型プレスを整備しま た。因みに、この船は重量185トン、速度6 ルトで洋上運航を実施しました。

シップアンドオーシャン殿向電磁推進船用推進装置 ('87~'89)

■ 133 1世 ルピ州ロノコ 11 たんご 20 5 イボールを円環状にクライオ ラトに収納したマグネット 最大 磁 場 デールのボア内に装備された雷 インダ / タン人 ■ 全意し、海水を押し出すことによ 蓄精エネルギー コイルサイズ マグネットサイズ

展 大 徳 場 5.9 T インダクタン人 3.7 H 蓄落エネルギー 20 MJ コイルサイズ φ360×φ101× L3814 mm マグネットサイズ W1850×L5240 mm 磁石タイプ ダイボール



これ等の設備を整えたことは、その後の加速器 用超伝導電磁石の製作に大きく寄与しました。 KEKの熱心なご指導のもと1988年~19 94年にかけてここに示しますように高磁界ダイポール超伝導電磁石及び4極超伝導電磁石の 製作にあたりました。

KEK殿向 10T双口径ダイポール ('88~'91)

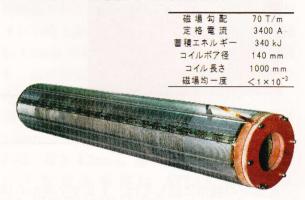
1つのヨークに2つの超伝導ダイポールを組み込んだマグネット



中心磁場	10 T
定格電流	12720 A
蓄積エネルギー	666 kJ
コイルボア径	50 mm
コイル長さ	1180 mm
磁場均一度	$<1 \times 10^{-4}$

KEK殿向 四極超伝導マグネット ('93~'94)

電気的に互いに反発しあってバラバラになってしまう荷電粒子のかたまり(ビーム)を電磁力で束ねる収束マグネット



これ等の経過を経てMQXの製作に取り組みました。MQXは日米の研究所で合同設計されて製作分担としてクライオスタットは米国、超伝導電磁石の製作は日本と決まりました。MQXは、衝突点で陽子ビームの直径を 10μ mに絞るために地場勾配 240 テスラ/m,磁場均一度 1/1000 、最大磁場 9.6 テスラ、口径 70 m 、長さ 5 mでしかも 1.8 k の超流動へリウムで冷却するといった極めて画期的な仕様でした。

当時、国内には1.8 kの超流動へリウムの試験 設備はありませんでした。そのため、KEKの御下命で直径1.5 m長さ9.5 mの1.8 kクライオスタットを製作してKEKに納入、据え付けました。

KEK股向 1.8Kクライオスタット ('99~'00) MQXの単体励磁試験用クライオスタット



使用冷媒 運転温度 容器外形寸法 貯液量 加圧超流動液体へリウム 1.8~1.9 K か1500×19500 mm 1800 I

電磁石の製作に関しては、1997年から単尺ものでR/Dを行ない、あらゆる問題点を洗い出してその解決に当たりました。そして、2000年から約4年をかけて予備2台を含む合計18台を量産体制を整えて製作しました。製作した電磁石は順次KEKに送り前記クライオスタットで励磁テスト、磁場測定を行ないました。

KEK/Fermi/CERN殿向 MQX ('98~'04)

LHCの衝突点近傍に組み込まれたビーム収束用4極超伝導マグネット

高精度巻線技術により非常に高い磁場精度を実現した。





製作台数

9.6 T 8057 A 2.8 MJ 70 mm 290 mm 8.5 ton 6.3 m 多極成分比 1×10⁻⁴以下

16台十予備2台

240 T/m

全数合格しました。 うち16台は米国Ferm i 研究所に送られ米国製クライオスタットに組み込まれ、その後セルンに搬送されて無事据え付けを完了しました。

2. おわりに

以上、経過を簡単に述べました。現在LHCでは約1400台の超伝導電磁石が1,8kの超流動へリウムで安定して運転されています。超伝導機器の信頼性は明らかに向上しています。これ等の事実を受けて如何に一般産業機器に適応していくかが問題だと思います。

殊に1,8 k 超流動へリウム冷却による新しい機器の開発、更に現在開発が行なわれている高温超伝導導体の実現により現在より取り扱いやすい機器が一日も早く生まれる事を願っています。以上です。

このたびは本当に有難うございました。

* 能谷賞

三伝導材料の開発を中心とする 工連器科学への開拓的貢献

元 古河電気工業

超電導開発部

目黒 信一郎

1 はじめに

古河電工では、1960年代から現在に至るまで、 ◆
属系超伝導線材の研究・開発・製造・販売活 動を継続・維持している。そして 1970 年代前 羊からは、国内外の素粒子実験用超伝導加速器 や検出器に、NbTi および Nb3Sn 超伝導線材を ₹供しはじめた。本報告書では最新の CERN-LHC を中心に、超伝導材料を通した古河電工の 加速器科学への貢献について報告する。

2 粒子加速器と古河電工の超伝導材料

表-1は古河電工が超伝導材料を提供した世 界の加速器の一覧表である。年代欄に示した記 号は材料の種類を示し、表の下に材料名を示し た。年代欄の横棒は開発から提供完了までの期 間を示す。コイルシステム C に用いられた材料 はBで、通信ケーブルDの超伝導体はPbであ

った。ここに見られるように、古河電工は30 年以上に亘り、途切れることなく世界の加速器 に超伝導線材を供給し続けることにより、材料 技術力を常に向上させてきた。この技術イノベ ーションが、時代と共に高性能化、大型化する 加速器の実現に貢献することを可能とした。

3. LHC 用超伝導材料

3.1 加速器・検出器用超伝導線材

受賞の対象は「超伝導材料」だが、具体的には、 図 - 1 に示した加速器や検出器に使われる超 伝導線材である。加速器のダイポールやクワド ラポールマグネットに使われる NbTi 成形撚線 と、衝突点の検出器に使われるアルミ安定化 NbTi 導体が代表的な超伝導線材である。

超伝導物質である直径 6 ミクロンの NbTi フィ ラメント約 6,400 本を無酸素銅に埋め込んだ直 径約 0.8mm の素線と呼ばれる線を、36 本撚り 合わせ、断面を長方形に成形したのが NbTi 成 形撚線である。直径 20 ミクロンの NbTi フィラ メント約 1,900 本を無酸素銅に埋め込んだ直径 約 1.2mm の素線 12 本からなる NbTi 成形撚線 を、高残留抵抗比、高強度の高純度アルミニウ ムに埋め込んだのがアルミ安定化導体である。 図-1の NbTi 成形撚線の外形寸法は、厚さ 1.5mm、幅 15mm で、アルミ安定化導体のそ れは、厚さ 4.3mm、幅 30mm である。このア ルミ安定化導体は ATLAS CENTRAL SOLENOID に用いられた。

表-1 世界の加速器と古河電工の貢献

楼関	国	加速器の名称	適用装置	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代
FNAL	米国	TEVATRON	偏向電磁石	——A—			
TNAL	木国	ILVAIRON	反陽子入射器	_	D(Pb) -		
KEK	日本	TRISTAN	TOPAZ検出器	-	- B,C -		
DESY	ドイツ	HERA	偏向電磁石		—A—		
BNL	米国	RHIC	収束電磁石			-A	
SSCL	米国	SSC	偏向電磁石			A —	
SOCL	木国	SSC	SDC検出器		-	В—	
理研	日本	RI Factory	SRC電磁石		See September 14	— В —	
KEK	日本	B Factory	偏向電磁石			-A-	
			偏向電磁石			——A	
CERN	EU	LHC	収束電磁石			- A -	
			ATLAS検出器			—В—	
KEK	日本	J-PARC	偏向電磁石			-A-	

A:NbTi成形撚線(Rutherford Cable) C:検出器用超伝導コイルシステム B:アルミ安定化NbTi導体

D:加速器制御用通信ケーブル

3.2 古河電工の貢献(1)

3.2.1 品質に関わる貢献

CERN と古河電工は 1998 年 8 月に下記のタイトルで LHC 用超伝導線材の供給契約を締結した。線材の略称は Cable 2 であり、今後この報告書でも、この略称を用いる。

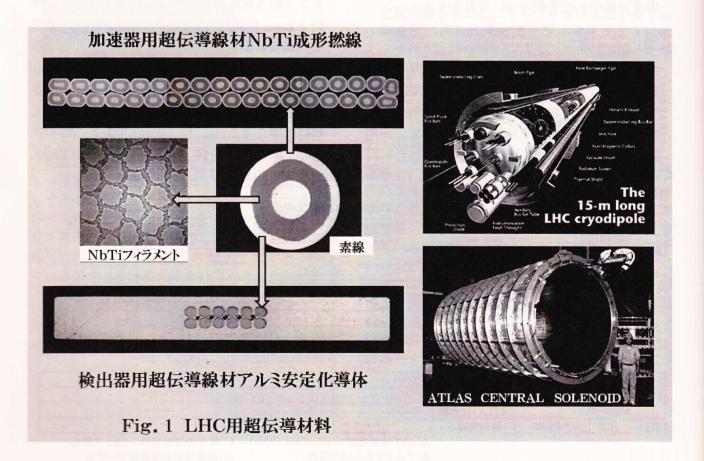
SUPPLY OF THE DIPOLE OUTER LAYER AND THE QUADRUPOLE SUPERCONDUCTING CABLE FOR THE LHC (CABLE 2)

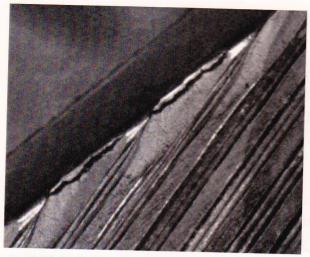
古河電工は、契約後ただちに CERN が定める品質認定プログラムに着手し、22ヶ月という長い時間を要したが、2000年5月に要求仕様をすべて満足する Cable2と CERN に認定され、量産開始のゴーサインが出た。これでも世界最速の達成であった。一方 LHC 線材の製造に参加した他の5社は、品質認定に難航し、一部の会社は仕様の達成は不可能と言い出し、仕様変

更を要求するという状況であった。従って古河の品質に関わる成果は LHC プロジェクトにとって大変な福音となり、古河が達成したという事実を根拠に、CERN は他 5 社を強力に指導することができたのであった。

超伝導線材のスペックダウンは加速器の性能低下に直接つながるものであり、LHC プロジェクトにとって決して受け入れることのできない重要事項であった。

各社が最も苦しんだのが、撚線成形時に撚線のコーナーで発生するバリの問題であった。古河電工は、圧延成形技術の原理・原則に立脚したエンジニアによる専用の圧延成形装置の開発と、現場の作業者による巧みな治工具の工夫により、バリのない成形撚線を実現した。Fig.2にバリの有無を示すCable2の写真を掲載した。1970年代から一貫して成形撚線技術に取組み、高度化する要求仕様に対応し続けてきた積み重ねが、LHCの高度な要求仕様にも対応することを可能にしたと言える。





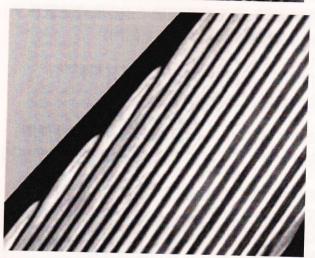


Fig.2 成形撚線のバリの有無

3.2.2 製造数量に関わる貢献

当初の契約では、古河電工が分担した製造数量は、全体の 1/8 で、100 トンの素線を製造し、その素線用いて 90 トンの撚線を製作するというものであった。2003 年 4 月に最後の撚線を工場出荷し、ほぼ契約通りの納期で量産数量の製造を完了した。これも世界最速の成果であった。この品質・数量に関わる成果に対して、古河電工は、下記のタイトルをもって、2003 年 5 月に CERN からゴールデンハドロン賞を授与された。

IN PRODUCING <u>HIGH QUALITY</u> SUPERCONDUCTING CABLE

一方、難しい製造技術に難航する他社は、製造

の遅れが深刻になりつつあった。LHC全体の建設工期に致命的影響を出さないため LHC プロジェクトの幹部はある判断を下した。すなわち、古河電工が他社の下請けとして入り、素線の製造と撚線加工を分担し、工期の遅れを最小に止めるという判断であった。

この結果、古河電工の担当数量は、最終的に、 素線製造が全体の 1/4、特に技術的に難しい撚 線加工が全体の 1/2 となり、契約当初の 3 倍の 数量を製造する結果となった。古河電工は 2006 年 1 月をもって、LHC 用超伝導線材の 7 年半 に及ぶ製造活動を完了した。この結果が LHC の建設に対して大きな貢献となったことは言 うまでもない。

4. まとめ

筆者は30年以上に及ぶ古河電工の加速器用超 伝導材料の研究・開発・製造・販売活動に直 接関与してきた。当然のことながら、決して 同じ仕様の超伝導線材が要求されることはな かった。新しい設計の加速器は、新しい仕様 の超伝導線材を要求した。常に新たな技術開 発を経て、必要な数量の超伝導線材を製造・ 供給するという義務が古河電工に課された。 このような厳しい仕事を成功させてきた最大 の要因は、要求者と供給者との間の真摯な信 頼関係にあったことを筆者は疑わない。

5. 謝辞

今回は熊谷賞という大変名誉ある賞をいただき、関係者の方々に深く感謝いたします。 また 30 年以上に亘り古河電工の超伝導技術を常にご指導、ご支援いただいた KEK の先生方に深く御礼申し上げます。

6. 参考文献

(1) S. Meguro,

"LHC Cable Production in Japan", Proceedings for 18th Magnet Technology Conference, IEEE Trans. Applied Supercond. Vol. 14, No.2, pp. 159 - 164 (2004)

第2回 西川シンポジウム開催記録

- 1. 開催日時 平成25年3月13日(水)13時00分~19時00分
- 2. 会 場 つくば国際会議場(エポカルつくば) 茨城県つくば市竹園2-20-3
- 3. プログラム [講演(2階中会議室202B)]

13:00-13:05 開会の挨拶

野村 昌治 (高エネルギー加速器研究機構 理事)

13:05-13:40 「小惑星と彗星の砂に秘められた初期太陽系進化」

中村 智樹(東北大学 理学部)

13:45-14:20 「ビームラインの中の地球-高温高圧実験で迫る地球物質科学」

佐野 亜沙美(JAEA 量子ビーム応用研究部門)

14:25-15:00 「持続可能社会へ向けての放射光が拓く触媒材料科学」

稲田 康宏(立命館大学 生命科学部)

15:25-16:00 「加速器中性子技術の高度化による工学材料研究の新展開」

佐藤 博隆(北海道大学 大学院工学研究院 量子理工学部門)

16:05-16:40 「RFe2O4 の電荷秩序型誘電性と最近の誘電体の話題」

池田 直(岡山大学 理学部)

16:45-17:20 「ミュオンスピン回転法による物性研究の最前線」

伊藤 孝(JAEA 先端基礎研究センター)

17:30-19:00 懇親会(1Fレストラン「エスポワール」)

4. 講演会記録 講演会(中会議室202B) 参加者:約30名





高エネルギー加速器セミナーOHO'13の開催予定

1. 開催場所: 高エネルギー加速器研究機構・3号館1階セミナーホール

2. 開催期日: 平成25年7月23日(火)から7月26日(金)までの4日間

3. 募集人員: 最大100人

4. テーマ(仮): X線自由電子レーザー SACLA

5. 講義の内容: 1時間を1コマとして全体で20コマ程度の講義と施設見学などで構成する

(1)X線自由電子レーザー(XFEL)の概論

(2)ビーム光学および電子銃や線形加速器、高周波源、アンジュレーター

などの構成装置の技術解説 (3)機構内加速器施設の見学

6. その他: 平成25年度はこれまで開催希望が多かったXFEL技術を取り上げる。

我が国唯一のXFEL加速器SACLAを題材にして、その要素技術を理研・播

磨研究所・放射光科学総合研究センターの研究者たちが講義する。



OHO'12講義風景



OHO'12参加者

第3回特別会講演会開催予定

- 1. 開催日時 平成25年10月3日(木)13:30~16:00
- 2. 場 所 アルカディア市ヶ谷(私学会館)住所 東京都千代田区九段北4-2-25)TEL 03-3261-9921(代表)
- 3. 題 目 1)「素粒子物理学の発展とILC」

講演者 東京大学大学院理学系研究科 教授 駒宮 幸男 (専門分野 素粒子物理学実験)

講演の概要

昨年7月に全ての素粒子の質量の起源とされる「ヒッグス粒子」が、L HCという陽子・陽子の衝突型加速器を用いた実験で発見されまた。 ヒッグス粒子が何者かを理解するために素粒子物理の歴史や宇宙と の関係をまず解説します。

次の展開は、LHCでの新現象の探索と、国際リニアコライダーILCによるヒッグス粒子の詳細研究などによって素粒子の標準理論を超える物理の方向を決定することです。

ILCでの実験は、電子・陽電子衝突のクリーンな環境での詳細研究を可能します。

2)「ILC加速器のデザイン・R&Dの状況と建設までの道のり」

講演者 高エネルギー加速器研究機構 名誉教授、理学博士 横谷 馨 (専門分野 加速器物理)

講演の概要

2004年の超伝導技術選択以来、ILC加速器設計チームはリニアコライダーの開発研究をすすめ、このほどその設計書を完成した。 これに至るまでの研究の歴史と、到達した加速器設計の概要を説明し、建設までの道のりを述べる。

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 西川賞・小柴賞・諏訪賞・熊谷賞候補者募集要網

1.趣 旨

高エネルギー加速器ならびに加速器利用に関る実験装置の研究において、特に優れた業績をおさめた研究者・技術者に西川賞・小柴賞・諏訪賞・熊谷賞を授与し、もって加速器科学の発展に資することを目的とする。

2. 対象となる候補者

西川賞: 高エネルギー加速器ならびに加速器利用に関る実験装置の研究において、独創性

に優れ、かつ論文発表され、国際的にも評価の高い業績をあげた、原則として50才

以下(応募締切時)の単数または複数の研究者・技術者

小柴賞: 素粒子研究のための粒子検出装置の開発研究において、独創性に優れ、国際的

にも評価の高い業績を上げた、原則として50才以下(応募締切時)の単数または複数

の研究者・技術者

諏訪賞: 高エネルギー加速器科学の発展上、長期にわたる貢献など特に顕著な業績があった

と認められる研究者・技術者・研究グループ

熊谷賞: 研究開発、施設建設など長年の活動を通じて、高エネルギー加速器や加速器装置へ

の顕著な貢献が認められる企業の加速器関係者

3. 年間表彰件数 各賞合わせて5件以内

4. 賞の内容 賞金は各賞30万円とする 表彰盾は課題毎に授与する

5. 選考方法 推薦のあった者について公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励

会選考委員会で選考し、理事会において決定する。

6. 選考 平成25年11月上旬

7. 提出書類 (1) 推薦書(当公益財団法人のホームページに掲載の様式による)

(2) 選考資料 研究業績に関する発表論文(3編以内)のコピー(各2部)

8. 提出期限 平成25年10月5日

9. 書類の提出ならびに問合せ先

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1 高エネルギー加速器研究機構内

TEL・FAX:029-879-0471 E メール:info@heas.jp

ホームページ:http://www.heas.jp/

2012(平成24)年度 事業報告

平成24年(2012年) 4月 1日から 平成25年(2013年) 3月31日まで

| 加速器科学の研究に対する助成

No	実施期間	研 究 課 題	氏 名	所属機関
1		次世代大型加速器施設の放射線管理のための広域 モニタリング手法に係わる研究	佐波俊哉	高エネルギー加速器研究機構

2 国際交流に対する助成

No	実施期間	研 究 課 題	氏 名	所 属 機 関
1	自 24.07.09 至 24.07.13	第11回放射光装置技術国際会議 "SRI2012" およびサテライト会議 "Science at FELs" 参加報告	山本 樹	高エネルギー加速器研究機構
2	自 24.12.03 至 24.12.08	PCaPAC2012〜の出席「STARS On Android」においての発表	小菅 隆	高エネルギー加速器研究機構

3 国際会議、学術講演会、シンポジュウム、セミナー等の開催助成

No	実施期間	研 究 課 題	氏 名	所 属 機 関
1	自 24.10.01 至 24.10.04	第1回国際ビーム計測、診断会議IBIC2012	三橋 利行	高エネルギー加速器研究機構
2	自 24.08.26 至 24.08.31	第34回 国際自由電子レザー会議(FEL2012)	新竹 積	沖縄科学技術大学大学院大学

4. 研究成果の褒賞

第2回 高エネルギー加速器科学研究奨励会 西川賞・諏訪賞・特別賞の授賞式の開催(平成25年2月18日)

賞	の名称	受 賞 者	所属機関	研究テーマ
西	川賞	中村 剛	高輝度光科学研究センター	「FPGAを用いた高機能 bunch-by-bunch フィー
<u> </u>	川 貝	小林 和生	高輝度光科学研究センター	ドバックシステムの開発研究」
20	111 246	£0.00 htt	高エネルギー加速器研究機構	「KEK低速陽電子ビームの強度増強とその応
四	西川賞 和	和田健	物質構造科学研究所	用に関する研究」
	engma (a ros		高エネルギー加速器研究機構	「ハードウェアベースの通信制御演算装置を用
小	柴 賞	内田 智久	素粒子原子核研究所	いた高速データ収集システムの開発研究」
	. Alt	/T ## \	一 /#/ 古 # 一	「超伝導磁石の開発をはじめとする加速器科学
熊	熊谷賞	伊藤進	元・㈱東芝 京浜事業所	への開拓的貢献」

賞の名称 受 賞 者 所属機関		所属機関	研究テーマ
社 公 地		二. 十河承层工类(州)	「超伝導材料の開発を中心とする加速器科学へ
熊谷賞	日無信一郎	元·古河電気工業㈱	の開拓的貢献」

5. 研修会・講演会の開催

No	実施期間	種別	テーマ	参加人数	参 加 料
1	自 24.09.04 至 24.09.07	研修会(主催)	高エネルギー加速器セミナー "OHO12 加速器の基礎と医療応用~医療のため の加速器	企業ほか100名	一般企業 5,000円 関係機関 2,000円 大学生・院生 無 料
2	自 24.10.05 至 24.10.05	講演会 (アルカディ ア市ヶ谷)	1. LHCの近況について 講演者 名古屋大学大学院理学系 研究科准教授 戸本 誠 氏 (LHCアトラス実験グループ) 2. ヒッグス粒子について 講演者 素粒子原子核研究所教授 磯 暁 氏 (KEK・素粒子理論)	賛助会員 20名	無料
3	自 25.03.13 至 25.03.13	研修会(主催)	第2回 西川シンポジウム 「若手研究者の夢が拓く物質科学のフロンティア」	理学系大学生・大学 院生・企業ほか30 名	

6. 加速器科学に関する出版物等の頒布

No	出版物等の名称	配布時期は各々発行時
1	高エネルギー加速器セミナーOHO'12テキスト	年 1 回
2	HIGH ENERGY NEWS	年 4 回
3	FASだより(公益財団広報誌)	年 2 回

7. 理事会の開催

口	期日・時間	開催場所	出席者・議案
第4回	平成24年5月31日 13時30分~14時	アルカディ ア市ヶ谷	出席者 木村嘉孝 佐藤 勇 羽方 亨 神谷幸秀 新富孝和 酒井 敬 議 案 1) 平成23年度事業状況報告及び平成23年度収支決算について 2) 選考委員会委員の交替について 3) 研修会(高エネルギー加速器セミナー(OHO 2012)の開催について 4) 講演会の開催について 5) 賛助会員の現況について
	AND DESCRIPTION OF STREET		6) その他

口	期日・時間	開催場所	出席者・議案
第5回	平成24年12月5日 13時30分~15時	高エネルギ 一加速器研 究機構 職員会館	出席者 木村嘉孝 佐藤 勇 神谷幸秀 新富孝和 酒井 敬 5名 議 案 1) 西川賞・小柴賞・熊谷賞の選考について 2) (公) 高エネルギー加速器科学研究奨励会定款の一部改正について 3) (公) 高エネルギー加速器科学研究奨励会選考委員会規則の一部改正について 4) (公) 高エネルギー加速器科学研究奨励会西川賞・小柴賞・諏訪賞・創谷賞・表彰基準の一部改正について 5) 平成25年度(2013年)事業計画について 6) 平成25年度(2013年)収支予算書(損益計算書)について 7) 研修会について 8) 講演会について 9) 賛助会員の現況について 10) その他

8. 評議員会の開催

口	期日・時間	開催場所	All refer to a second s		
To.	231 E 1 HJ		出席者・議案		
	22/40/03		出席者 浅野克彦 長島順清 矢野安重 横溝英明 大野英雄 袴田敏一 酒井 敬 木村嘉孝 佐藤 勇 羽方 亨 神谷幸秀 新富孝和 議 案		
第4回	平成24年5月31日 14時~15時	アルカディ ア市ヶ谷	1) 平成23年度事業状況報告及び平成23年度収支決算の件 2) 選考委員会委員の交替の件 3) 研修会(高エネルギー加速器セミナー(OHO 2012)の開催の件 4) 講演会の開催の件 5) 賛助会員の現況の件 6) その他		
第5回	平成 25 年 2 月 18 日 13 時 30 分~14 時 30 分	アルカディア市ヶ谷	出席者 浅野克彦 長島順清 矢野安重 横溝英明 大野英雄 袴田敏一酒井 敬 木村嘉孝 神谷幸秀 佐藤 勇 新富孝和 議 案 1)役員の選任の件 2)(公)高エネルギー加速器科学研究奨励会定款の一部改正(案)の件 3)平成25年度(2013年)収支予算書(損益計算書 案)の件 4)平成25年度(2013年)収支予算書(損益計算書 案)の件 5)(公)高エネルギー加速器科学研究奨励会選考委員会 選考結果の件 6)(公)高エネルギー加速器科学研究奨励会選考委員会規則の一部改正の件 7)(公)高エネルギー加速器科学研究奨励会選考委員会規則の一部改正の件 8)研修会の件 9)講演会の件 10)賛助会員の現況の件 11)その他		

9. 平成24年度 収支決算監査

平成25年4月19日(金)午前に監事 酒井 敬公認会計士による監査を受検した。

正味財產增減計算書

平成24年4月1日から平成25年3月31日まで

(単位:円)

科目	当年度	前年度	増 減
I. 一般正味財産増減の部	77/4-		
1. 経常増減の部	图一个原本版 (数)	HARRIST BOOK	
(1)経常収益	NE - CONTROL - 11-2	AND SECTION AND ADDRESS OF THE PARTY OF THE	
基本財産運用益	1 1 2 2 2 3 5 5 5 6 1 3		
基本財産受取利息	2,031,141	2,794,635	△ 763,494
特定資產運用益	77 15 3 (4)		
特定資産受取利息	962	210	752
受取会費	the best of the section of the second		
賛助会員受取会費	5,200,000	5,500,000	△ 300,000
事業収益			
講習会等事業益	173,760	159,320	14,440
受取寄附金		TOTAL SERVICE	Hara Ball
会議·助成·寄附金	0	0	0
雑収益			
預金受取利息	602	6,361	△ 5,759
経常収益計	7,406,465	8,460,526	△ 1,054,061
(2)経常費用		1-2-43trx	
①事業費	an propagation assumed to	原学系式中华一大学	
研究助成費	200,000	1,614,000	△ 1,414,000
国際交流助成費	350,000	70,000	280,000
国際会議助成費	750,000	334,050	415,950
褒賞費	1,832,515	1,193,688	638,827
講習会開催費	666,237	230,822	435,415
出版物頒布費	472,080	223,965	248,115
印刷製本費	72,450	30,000	42,450
諸謝金	0	40,000	△ 40,000
給料手当	918,000	1,174,740	\triangle 256,740
旅費交通費	328,200	336,700	△ 8,500
通信運搬費	65,755	59,381	6,374
消耗品費	785	40,855	\triangle 40,070
賃借料	129,885	275,415	\triangle 145,530
光熱水料費	22,387	30,000	\triangle 7,613
維費	14,595	5,565	9,030
事業費合計	5,822,889	5,659,181	163,708
②管理費	3,522,630	0,000,101	103,700
給料手当	2,100,000	2,388,000	△ 288,000
会議費	67,120	63,444	3,676
旅費交通費	175,000	104,500	70,500
通信運搬費	39,984	67,113	$\triangle 27,129$
什器備品費	8,071	18,721	\triangle 27,129 \triangle 10,650
消耗品費	94,719	51,418	43,301

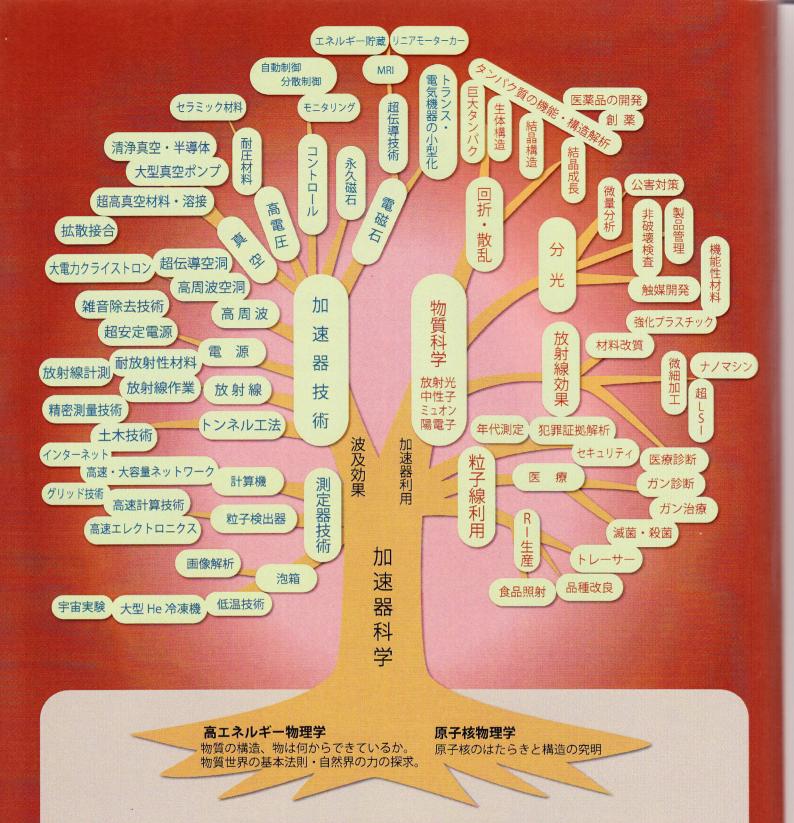
科目	当年度	前年度	増減
印刷製本費	29,400	0	29,400
賃借料	129,885	0	129,885
諸謝金	50,000	50,000	0
光熱水料費	22,387	27,589	△ 5,202
雑費	15,133	17,400	\triangle 2,267
管理費合計	2,731,699	2,788,185	△ 56,486
経常費用計	8,554,588	8,447,366	107,222
当期経常増減額	△ 1,148,123	13,160	△ 1,161,283
2. 経常外増減の部	lais to the later of		
(1)経常外収益	0	0	0
(2)経常外費用	0	0	0
経常外費用計	0	0	0
当期経常外増減額	0	0	0
当期一般正味財産増減額	△ 1,148,123	13,160	△ 1,161,283
一般正味財産期首残高	125,794,426	125,781,266	13,160
一般正味財産期末残高	124,646,303	125,794,426	△ 1,148,123
Ⅱ. 指定正味財産増減の部			
受取補助金等	0	0	0
Ⅲ. 正味財産期末残高	124,646,303	125,794,426	△ 1,148,123

■ 編集後記 ■

- 賛助会員の皆様方には益々ご清栄のこととお慶び申し上げます。 日頃より、当公益財団法人に対する格別のご協力を頂き、心から厚く御礼申し上げます。
- 当公益財団法人も公益財団法人に移行後2年を経過し、過日、平成24年度事業報告及び決算報告を行い、評議委員会におきまして承認をいただきました。
- 本文中にもご案内いたしましたが、平成25年度も「高エネルギー加速器セミナー OHO'13」を開催する予定です。
- また、「第3回特別講演会」も開催する予定です。多くの皆様のご参加をお待ちしております。
- 当公益財団法人では、多くの皆様に「公益財団法人 高エネルギー加速器科学 研究奨励会」をお知りいただくために、平成25年1月にパンフレットを、2月にホームベージをリニュアールいたしました。
- 研究報告等を見やすくするために、広報誌「FASだより」も第6号からモノ黒印刷から全面カラー印刷に変更いたしました。
- ●「ホームベージ」・広報誌「FASだより」等をご覧いただき、より良いものにするため に皆様のご意見をお待ちしております。
- 賛助会員のバナー広告掲載について 当公益財団法人のホームページ上に賛助会員様のバナー広告を掲載しております。

バナー広告掲載を希望される賛助会員様は、ぜひご利用ください。(無料)

<連絡先:info@heas.jp又はTEL/FAX029-879-0471>



物理、化学、生物など全ての基礎科学

発 行 公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会

〒305-0801

つくば市大穂 1-1 高エネルギー加速器研究機構内(職員会館 2F)

TEL · FAX: 029-879-0471

E-mail: info@heas.jp

URL: http://www.heas.jp/