

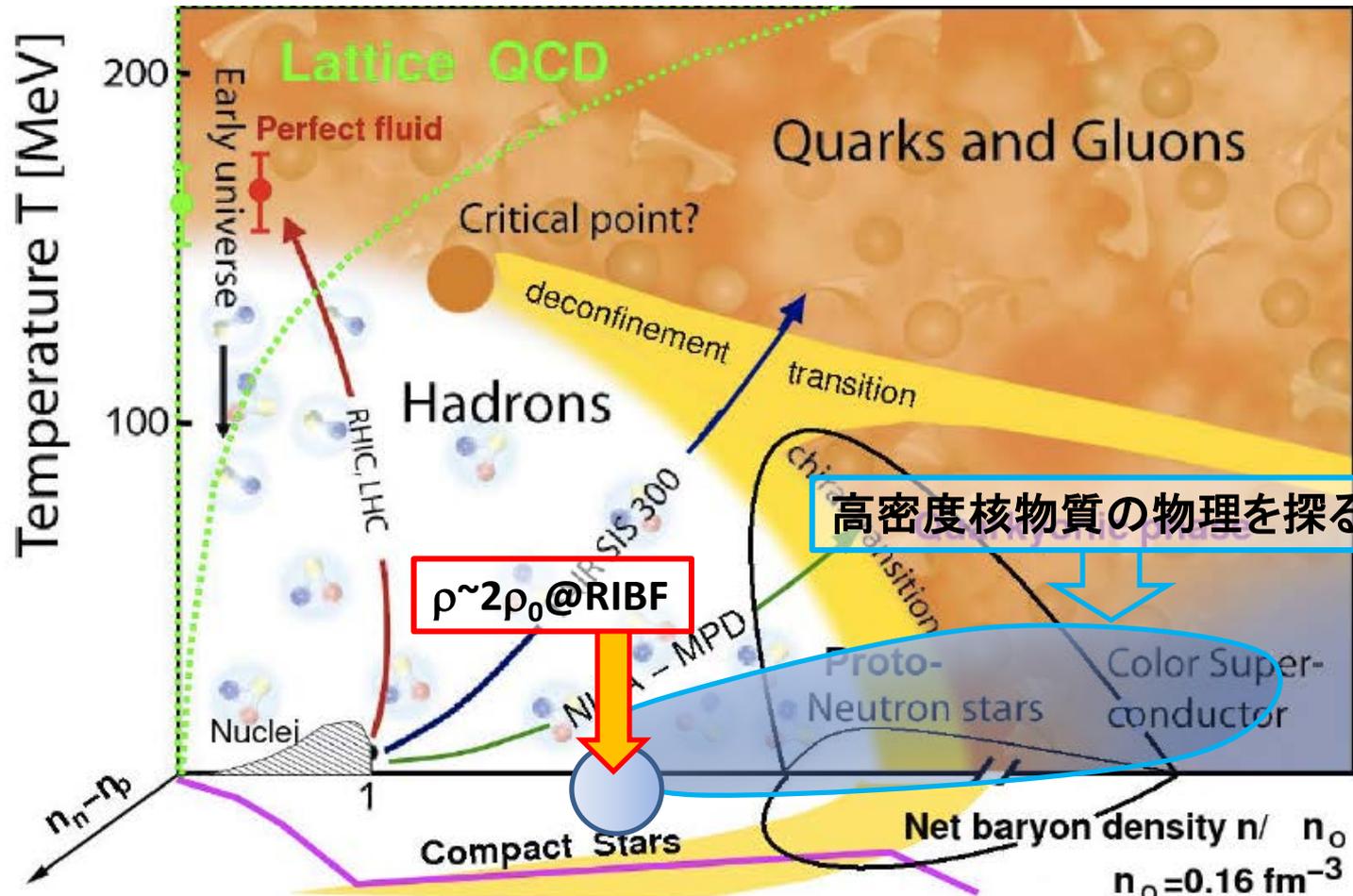


中性子物質をさぐる 時間射影型3D飛跡検出器の開発

理研仁科加速器研究センター

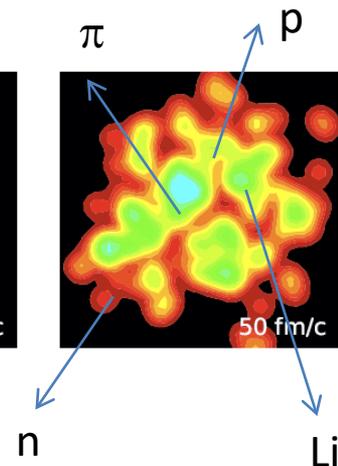
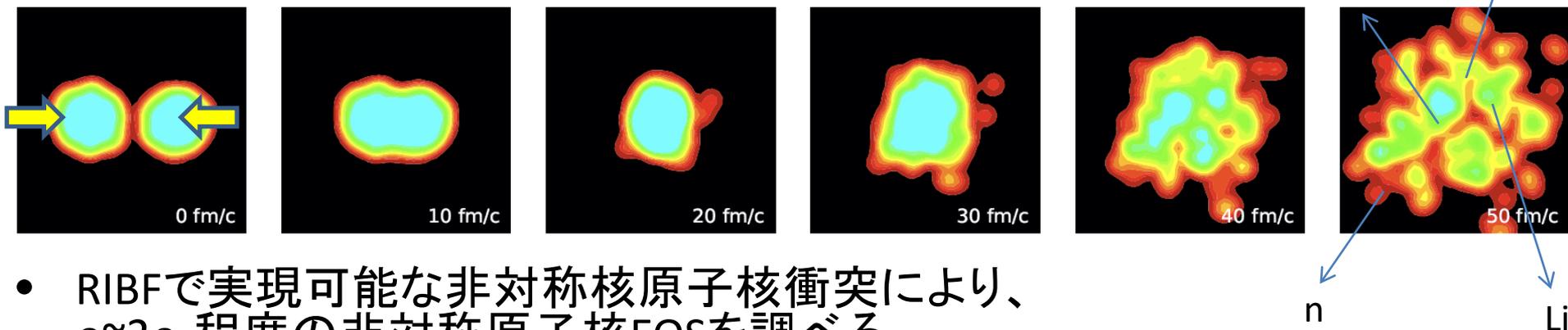
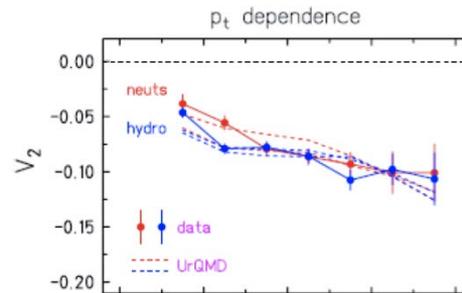
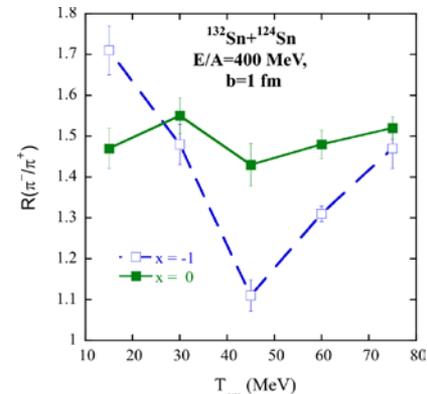
磯部忠昭

研究動機：中性子過剰な核物質の 状態方程式の解明

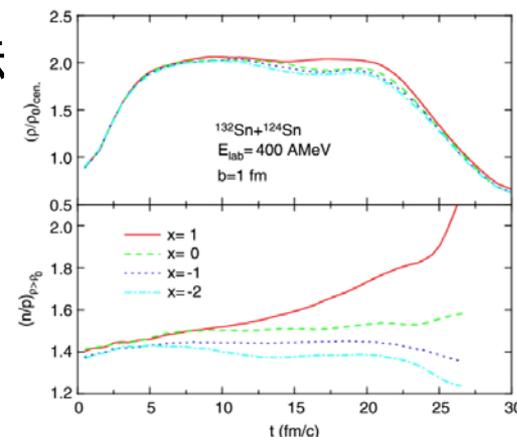


- 状態方程式 (Equation of State, EOS): 系のエネルギーと「温度」・「密度」・「原子核非対称度(陽子-中性子比)」の関係
- 非対称原子核衝突を用いて、中性子過剰高密度物質の性質を探る
 - 中性子星や超新星爆発といった宇宙物理学に対して重要なインプット

RIBFでアプローチする非対称高密度核物質：重RI衝突実験

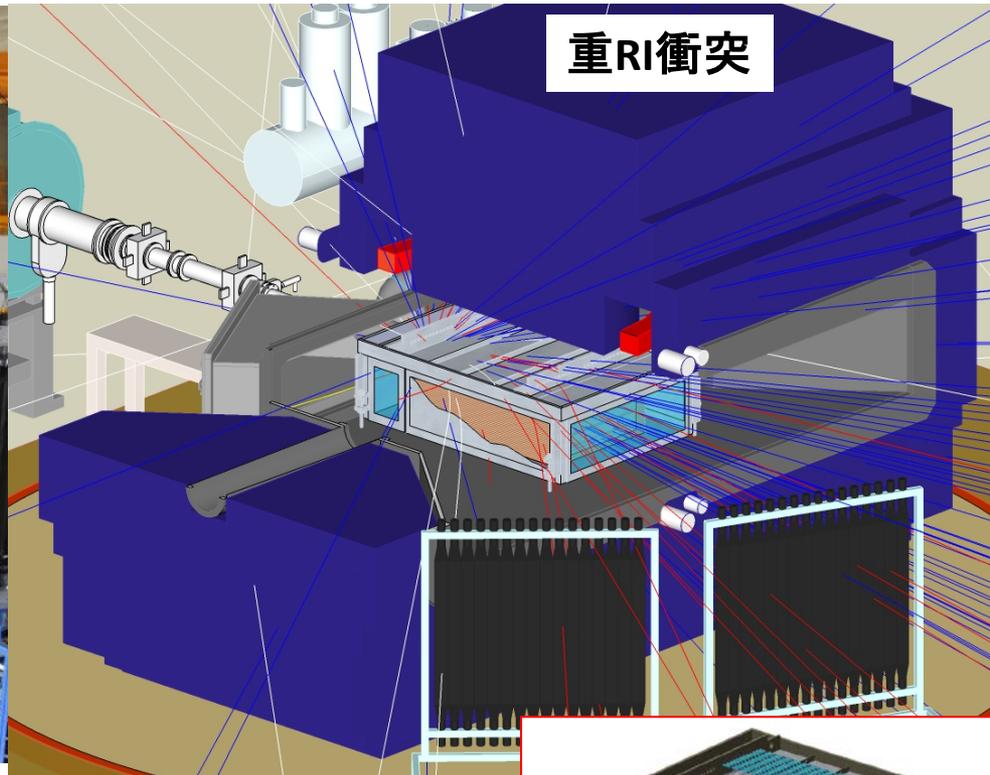


- RIBFで実現可能な非対称核原子核衝突により、 $\rho \sim 2\rho_0$ 程度の非対称原子核EOSを調べる。
 - 高密度領域に実験室でアプローチする唯一の方法
 - 衝突から発生する粒子を測定する事で高密度EOSに制限をかける。
 - 荷電パイオン・陽子・中性子・軽イオン
 - 収量・フロー
- 数十個の粒子を大立体角で同時に測定する必要がある。
 - 3次元分離能をもつ多種多重粒子検出デバイス



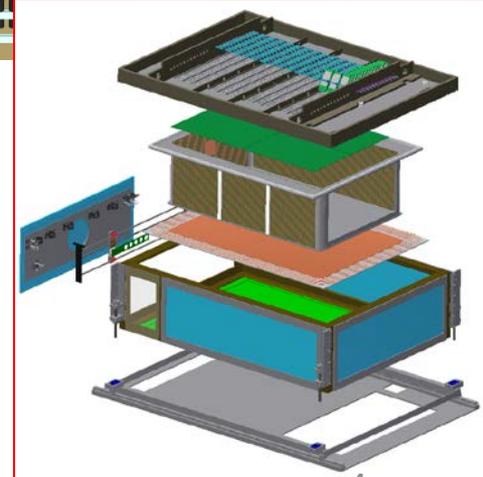
RIBF-SPIRIT計画

SAMURAI超伝導電磁石

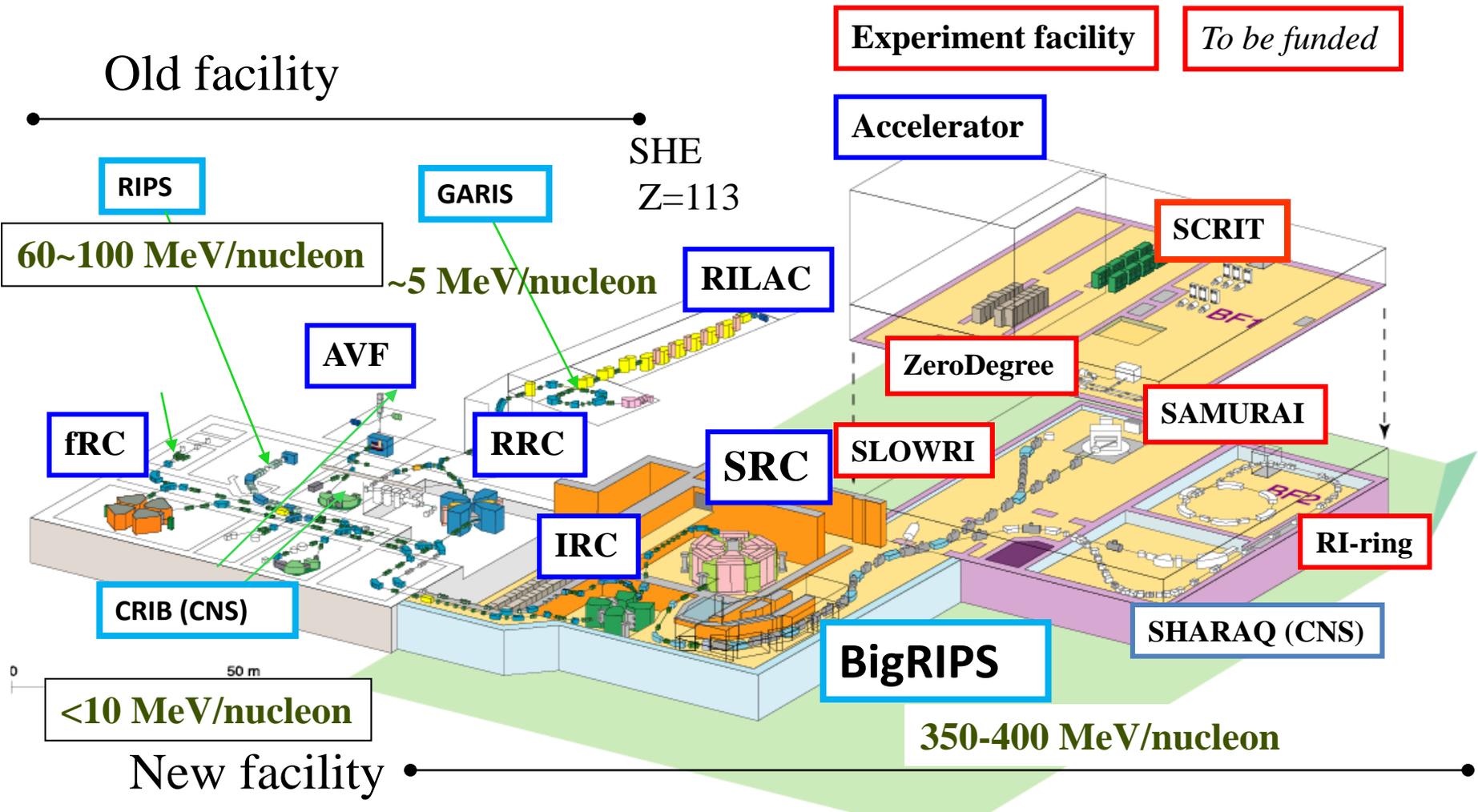


重RI衝突

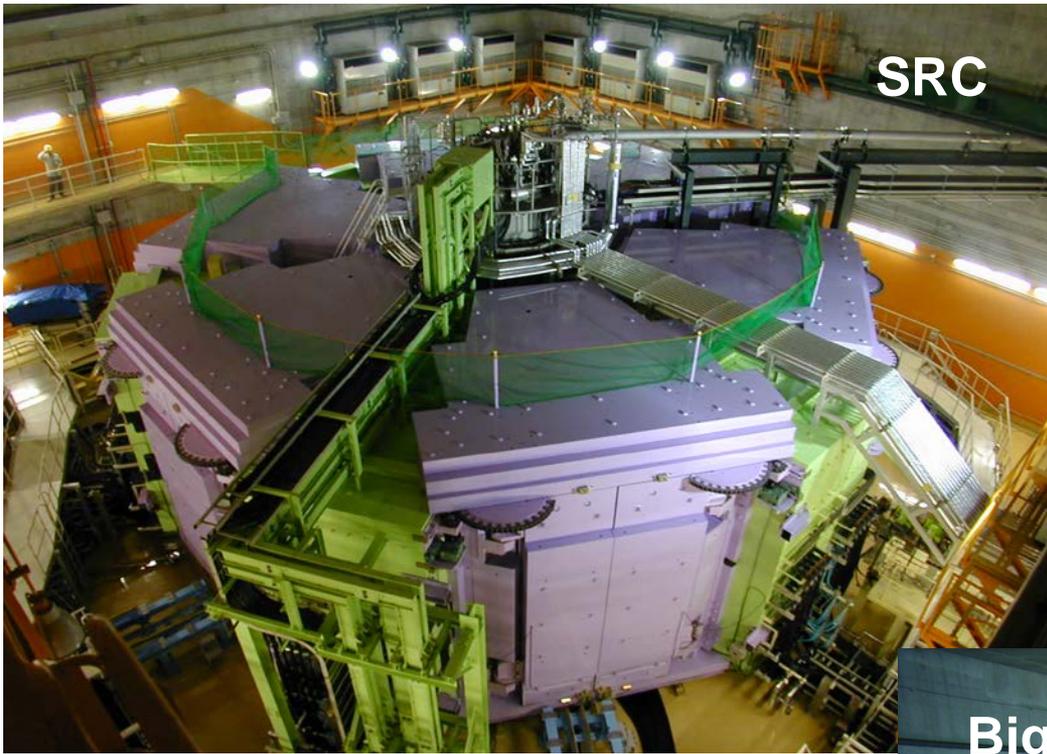
- 2009年ごろより、日米が中心となる重RI衝突実験計画が始動。
 - RIBF-SAMURAI基幹装置に多種多重粒子測定用の時間射影型3D飛跡検出器を設置。
 - DoEと新領域科研費の予算を使用。
- 2016年春に試運転+物理実験



RIKEN RI Beam Factory (RIBF)



Intense (80 kW max.) H.I. beams (up to U) of 345A MeV at SRC
 Fast RI beams by projectile fragmentation and U-fission at BigRIPS
 Operation since 2007



SRC

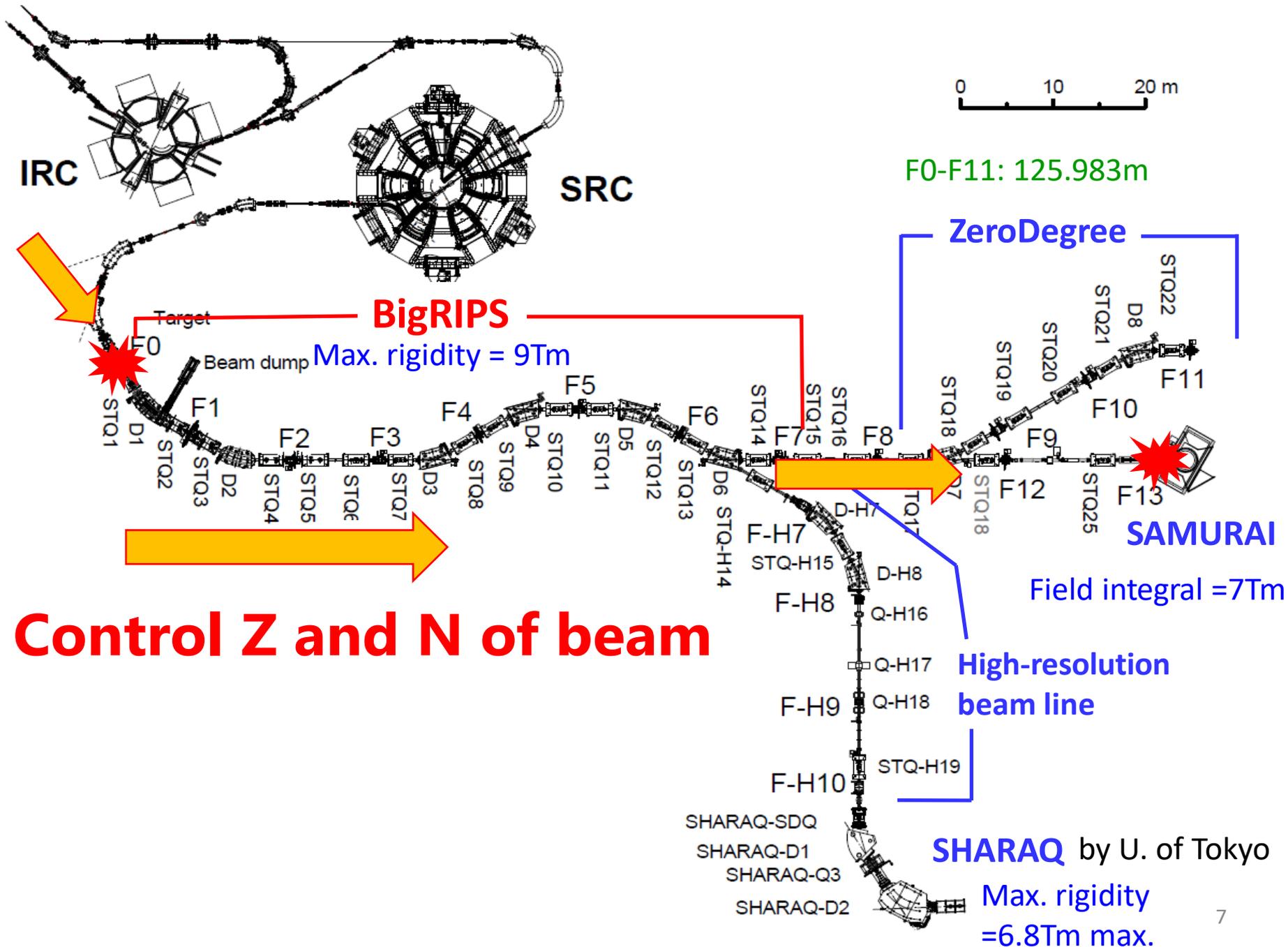
**World's First and Strongest
K2600MeV
Superconducting Ring Cyclotron**

400 MeV/u Light-ion beam
345 MeV/u Uranium beam

**World's Largest Acceptance
9 Tm
Superconducting RI beam Separator
~250-300 MeV/nucleon RI beam**



BigRIPS



SAMURAI Spectrometer

Superconducting Analyzer for Multi particles from Radio Isotope Beams

IRC

SRC

F0-F11: 125.983m

ZeroDegree

STQ22

D8

STQ21

F11

STQ20

F10

F9

F8

STQ18

STQ19

STQ18

D7

STQ18

F12

STQ25

F13

SAMURAI

Field integral = 7Tm

High-resolution beam line

D-H8

Q-H16

Q-H17

Q-H18

STQ-H19

SHARQA by U. of Tokyo

Max. rigidity = 6.8Tm max.

B < 3T

R: 1m

Gap: 80cm

2011/8/25

RIBFでの実験の特徴(人的要素)

- 大局的には原子核の理解という名目だが、それぞれ異なる物理を見ている
 - 人の実験を手伝う事で、自分の実験を手伝ってもらおう
- RIBF全体としては500名規模
 - RIBFコラボレーションと考えるとわかりやすい
 - 一論文の著者数は数十人
- ハードウェア・ソフトウェアとともに基盤を支えないと、実験の質がもたない
 - これまでの小規模実験ではOスタートでもうまく行くが、RIBFでは無理
 - 実際RIBビーム作りのところは専門のチームが存在する

RIBFでの実験の特徴(技術要素)

- 電荷=1粒子だけではない。
- RIビーム by RIビームでのRIビーム同定を行う。
- dE – TOF – $B\rho$ 測定

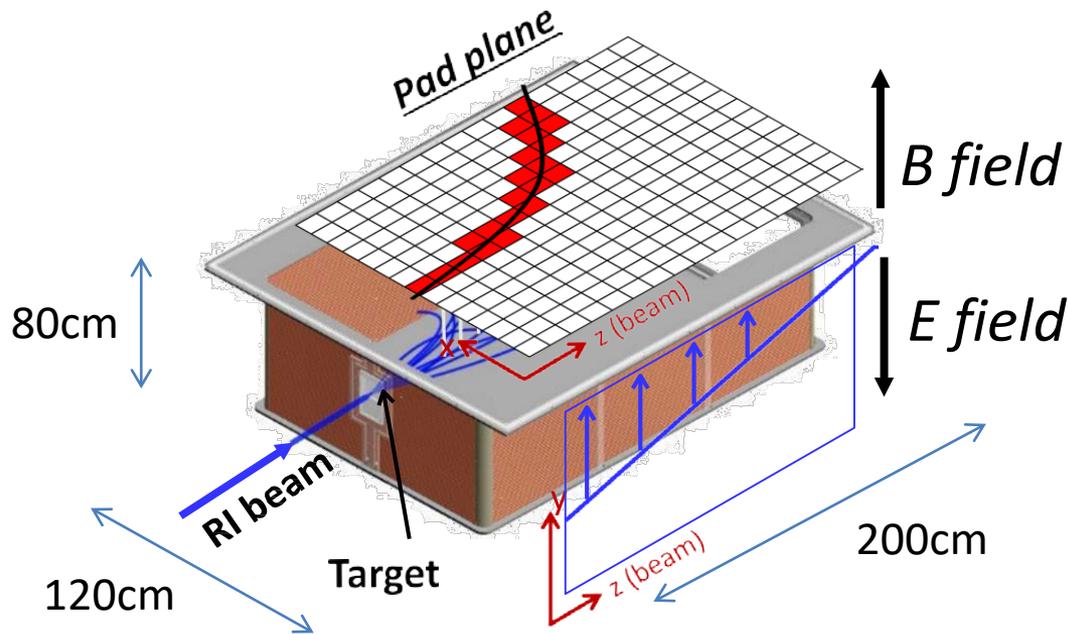
RIBFでの実験の特徴(開発要素)

- キーワードは
- 高レート
- ワイドダイナミックレンジ

RIBFでの実験の特徴(開発要素)

- 電荷=1粒子だけではない。
- 実験によってはZが小さいものと大きいものを同一の検出器で取りたい
 - 陽子とネオン($Z=10$)を同一検出器で取る: 100倍の信号差
- RIビーム by RIビームでのRIビーム同定を行う。
- dE – TOF – $B\rho$ 測定
- 100kHz程度が今の限界。トリガーレートで~1kHz。
- x100くらいいけないか？
- 実験限界が検出器限界で決まってしまう

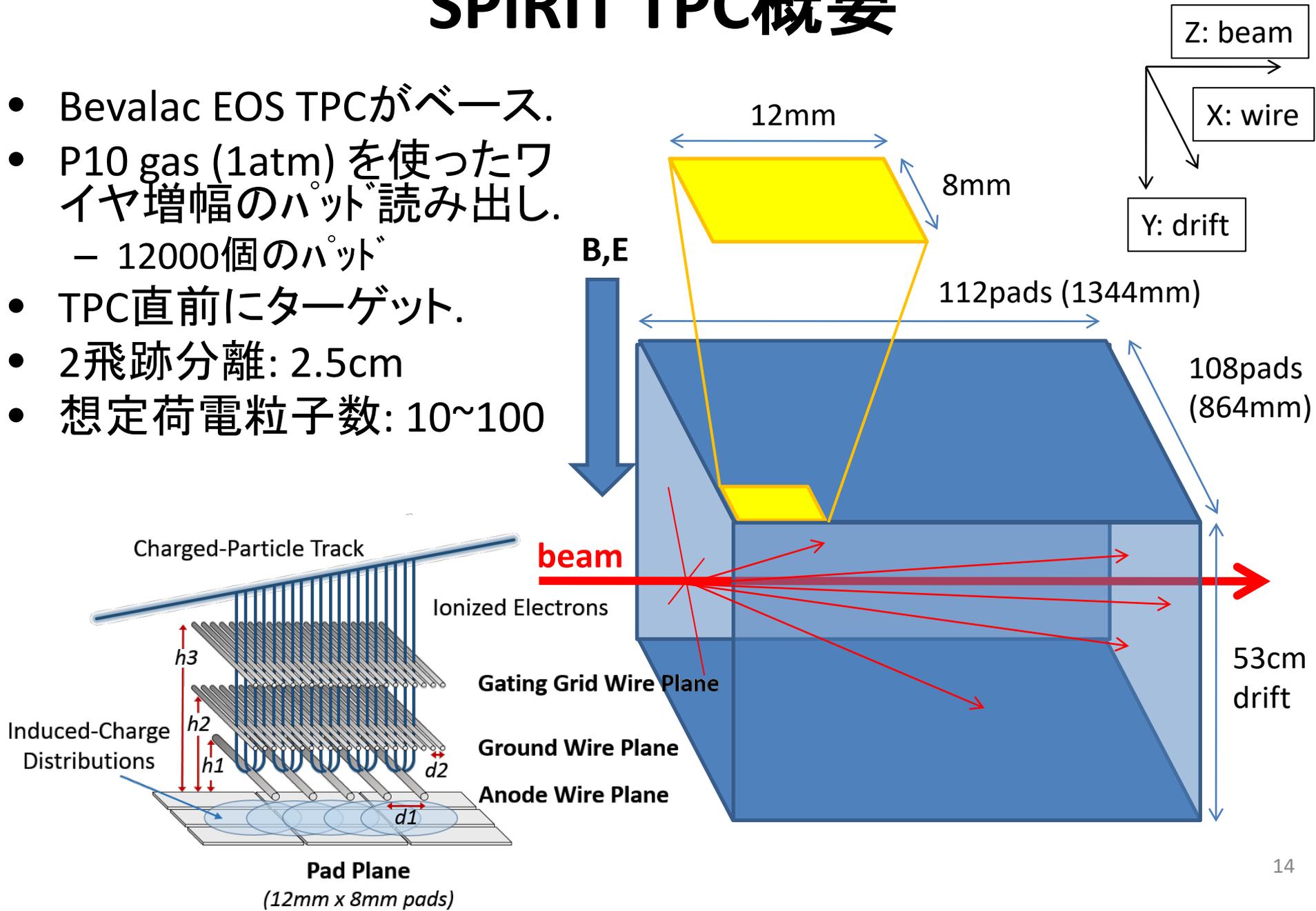
SPIRIT計画の基幹デバイス：時間射影型3D飛跡検出器、Time Projection Chamber (TPC)



- 重RI衝突にて発生した多数の荷電粒子を全て3Dイメージングする。
 - 放射線通過時に内部ガスがイオン化し、発生した電子の到達場所・到達時間を測定。
 - どんな粒子がどの程度のエネルギーで通過したか測定。
- これまでRIBFにないタイプの大型検出器。
 - x10 ~ x100の数のセンサー数。

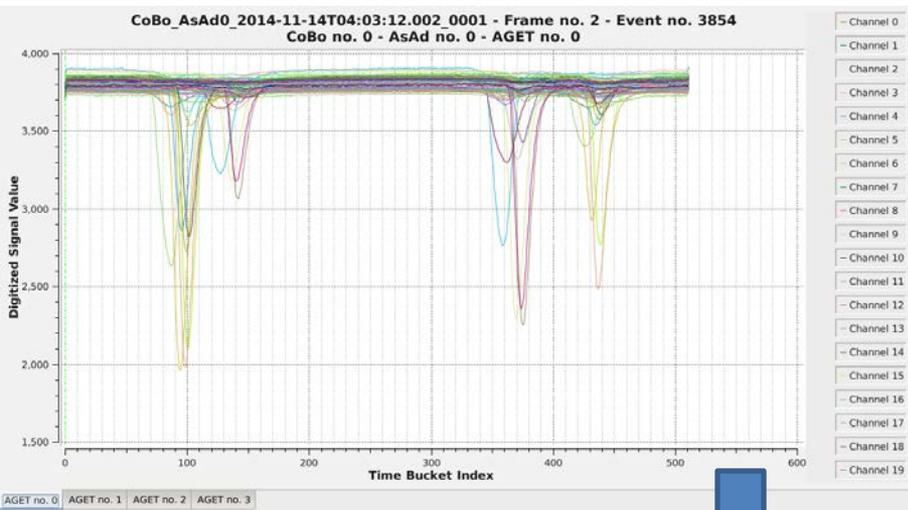
SPiRIT TPC概要

- Bevalac EOS TPCがベース.
- P10 gas (1atm) を使ったワイヤ増幅のパッド読み出し.
- 12000個のパッド
- TPC直前にターゲット.
- 2飛跡分離: 2.5cm
- 想定荷電粒子数: 10~100

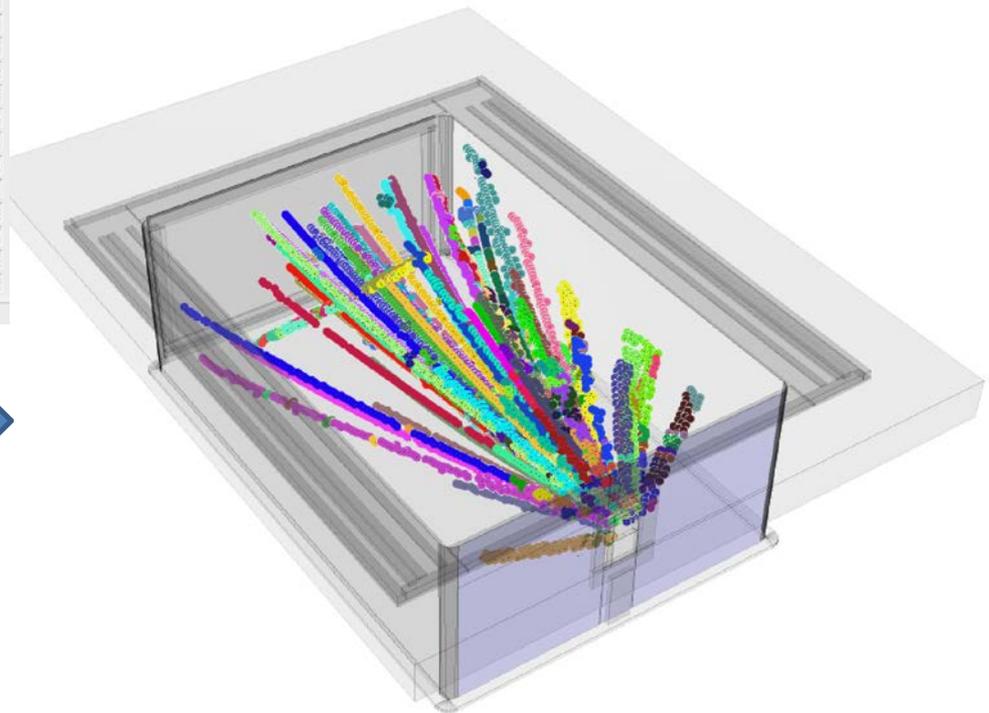


TPCにおける信号の読み出し

- TPC中におけるエネルギーロスが、電子-イオン対を生成 → ドリフトさせた電子をワイヤで増幅し、信号を読み出す。



Reconstruction of charged particle tracks



実験条件

- TPC中を重イオンビームが通過する
 - →RIBFで生成される2次ビームは収量をかせぐために、ビームラインアクセプタンスが大きく、必ずしもきれいなペンシルビームが通るとは限らない
 - Angular acceptance: 80mrad(H) x 100mrad(V)
 - →gating gridによる、anode領域の保護は必須
- TPC自体が受けられるビームrateとして20kHzを仮定
 - 実際にはそれ以上も可能かとも思われるが、ビーム自体による電場の歪みの評価が必要
- Targetの厚さにも依存するが、そのうち1%がreaction (i.e. 重イオン衝突)
- Trigger rate: up to 数百Hz
- 重イオンが通過する中でZ=1粒子検出が必要

SPIRIT-TPCの読み出しシステム:GET

- 性能要求:
 - 高いDAQ rate ($\sim 1\text{kHz}$)
 - 広いADCレンジ ($>10\text{bit}$).
 - 重イオンが飛ぶ中で、 $Z=1$ 粒子をきちんと測定できる.
 - 低消費電力
- → **GET** systemを採用. General Electronics for TPC.
 - 次世代エレキとして主に米国・フランスにより開発された統合システム.
 - RIBFだけではなく、J-PARCや他原子核実験にて採用
 - readout 12bit ADC 512 samples from 12000 pads under 1kHz DAQ rate が可能に.
 - 消費電力は0.1W/ch
 - コミコミで $\sim 5000\text{JPY/ch}$

2009/10~2014/9

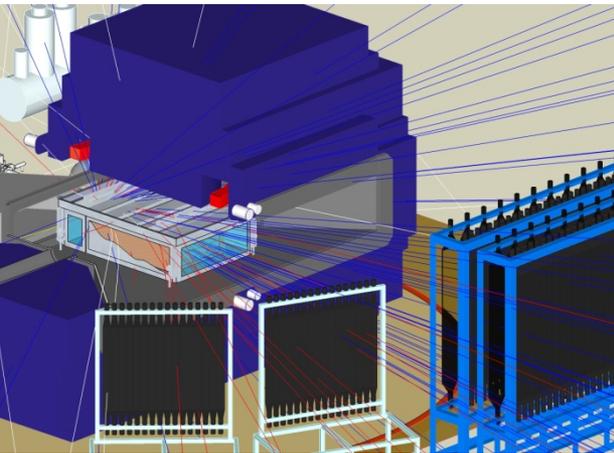


GET general meeting
at France CAEN

SYSTEM GET

Generic Structure (H&S)

2¹² Final Dyn Rnge
10Gbit B.width
4 Level Digital Trigger



SPiRiT TPC:
48 AsAd boards
12 CoBo boards
2 μ -TCA crates
2 MuTANT boards

V. Front End
Pre-amp
&
Filter
Protection

Concentrator Embedded SystemS:
.T. Stamp
. '0'-suppress
.Formatting
.Reduction
.Calibration
Slow Control

FARM
Trigger4
Event-Building
Data Control
S. Control
Web Service
Security

ZAP

AsAd
AGET
ADC
FPGA
PULSER

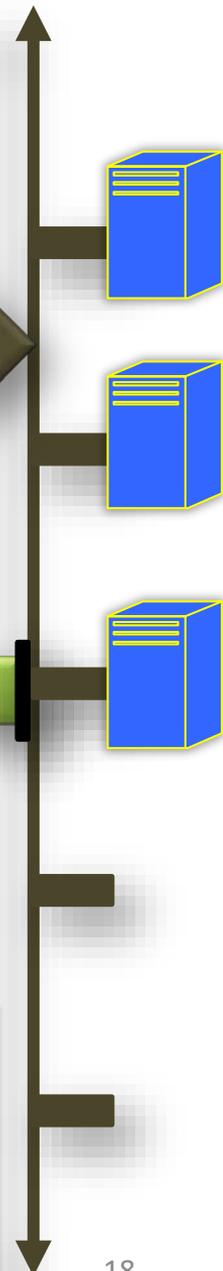
CoBo
FPGA
+
Memo

μ -TCA

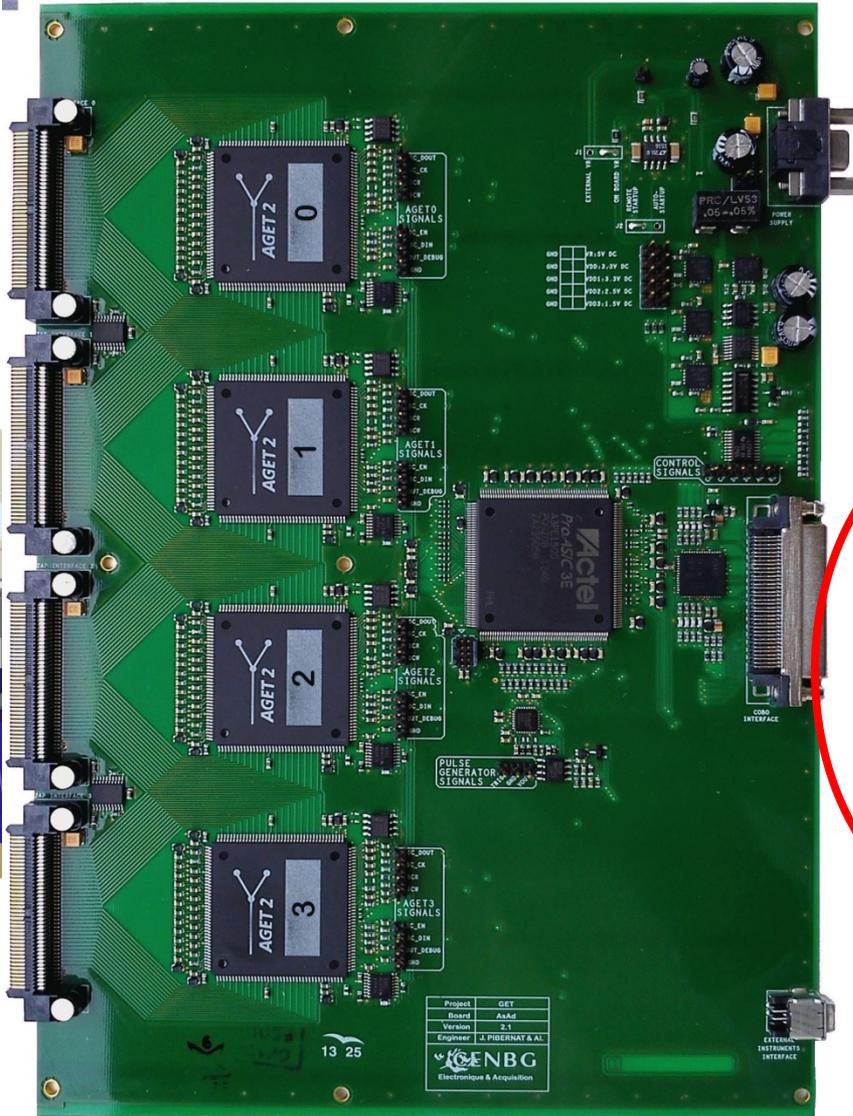
Mutant
FPGA

Front-End
Coding
V, I, EM & Temp
Control/Satb

3-Level
.Trigger
.Clock
.Calculated
Selected
Read-out



SYSTEM GET



2 μ -TCA crates
2 MuTANT boards

Concentrator
Embedded
SystemS:
.T. Stamp
. '0'-suppress
.Formatting
.Reduction
.Calibration
Slow Control

FARM
Trigger4
Event-
Building
Data
Control
S. Control
Web
Service
Security

AsAd
AGET
ADC
FPGA
PULSER

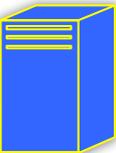
CoBo
FPGA
+
Memo

μ -TCA

Mutant
FPGA

Front-End
Coding
 v, I, EM & Temp
Control/Satb

3-Level
.Trigger
.Clock
.Calculated
Selected
Read-out



SYSTEM GET

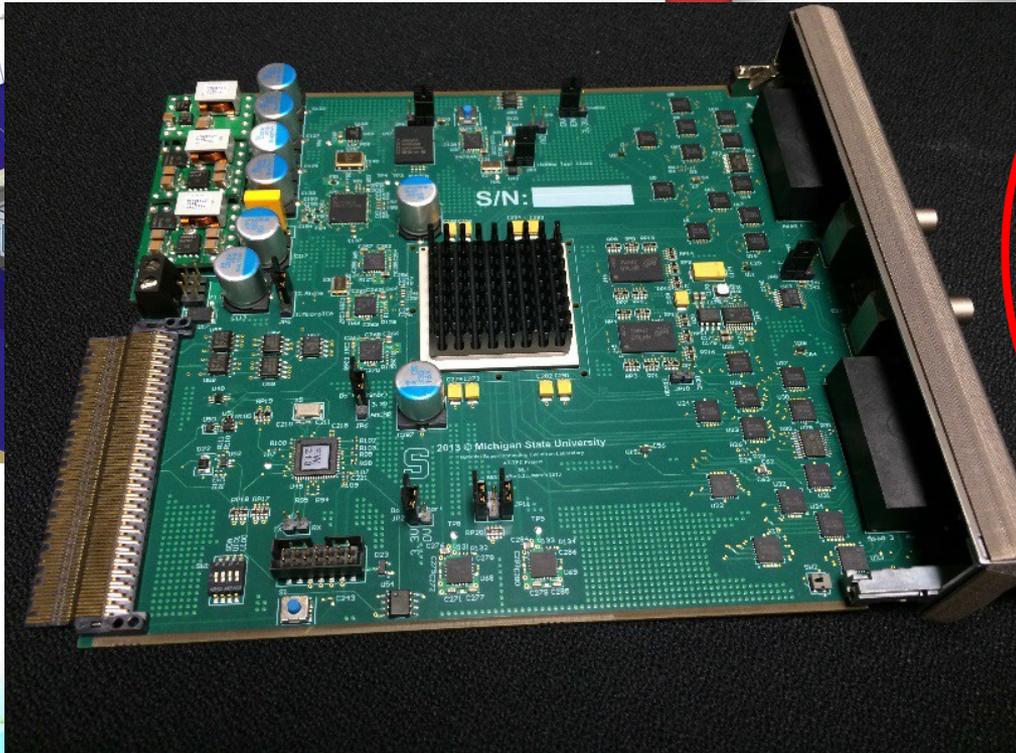
Generic Structure (H&S)

2¹² Final Dyn Rnge
10Gbit B.width
4 Level Digital Trigger

V. Front End
Pre-amp
&
Filter
Protection

Concentrator
Embedded
SystemS:
.T. Stamp
. '0'-suppress
.Formatting
.Reduction
.Calibration
Slow Control

FARM
Trigger4
Event-
Building
Data
Control
S. Control
Web
Service
Security



2 MuTANT boards

CoBo
FPGA
+
Memo

Mutant
FPGA

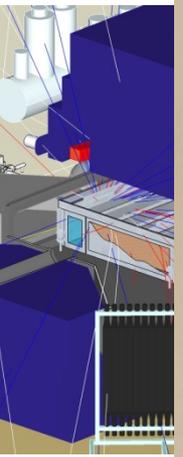
μ - T C A

3-Level
.Trigger
.Clock
.Calculated
Selected
Read-out



SYSTEMS

General
 2¹² Fir
 10Gbi
 4 Leve



Concentrator
 Embedded
 SystemS:
 .T. Stamp
 . 'O'-suppress
 .Formatting
 .Reduction
 .Calibration
 Slow Control

FARM
 Trigger4
 Event-
 Building
 Data
 Control
 S. Control
 Web
 Service
 Security

sAd
 GET
 ADC
 PGA
 LASER

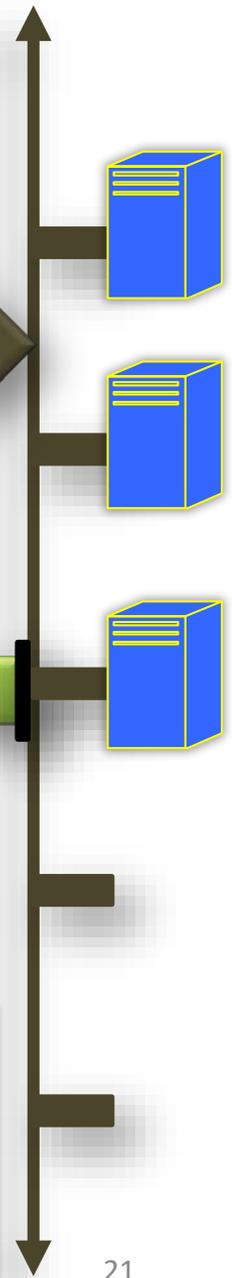
nt-End
 ding
 & Temp
 ol/Satb

CoBo
 FPGA
 +
 Memo

Mutant
 FPGA

3-Level
 .Trigger
 .Clock
 .Calculated
 Selected
 Read-out

μ - T C A



SYSTEM GET

Generic Structure (H&S)

2¹² Final Dyn Rnge

V. Front End
Pre-amp



2 MuTANT boards

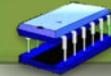
Concentrator Embedded SystemS:

- .T. Stamp
- . 'O'-suppress
- .Formatting
- .Reduction
- .Calibration
- Slow Control

FARM

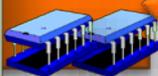
Trigger4
Event-Building
Data Control
S. Control
Web Service
Security

CoBo
FPGA + Memo



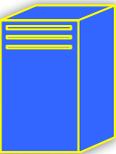
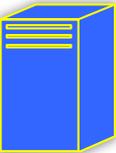
Mutant

FPGA



μ - T C A

3-Level
.Trigger
.Clock
.Calculated
Selected
Read-out



GETシステムについて

- ASICを含むフロントエンドハードウェアをフランスが開発(CEA, CENBG)
- コントロールハードウェアをアメリカが開発(MSU/NSCL)
- 日本はDebugモジュールの開発(RIKEN)
- ソフトウェアはフランス(CEA, GANIL)

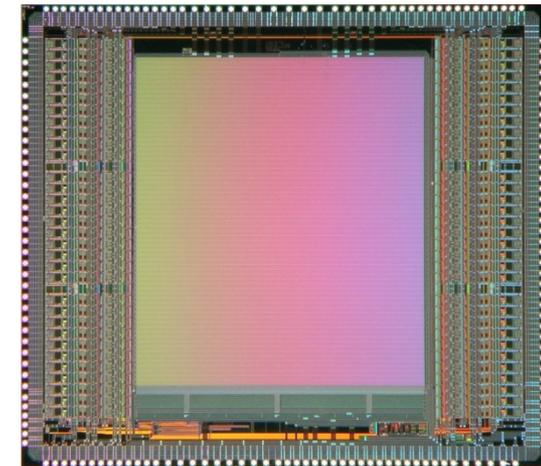
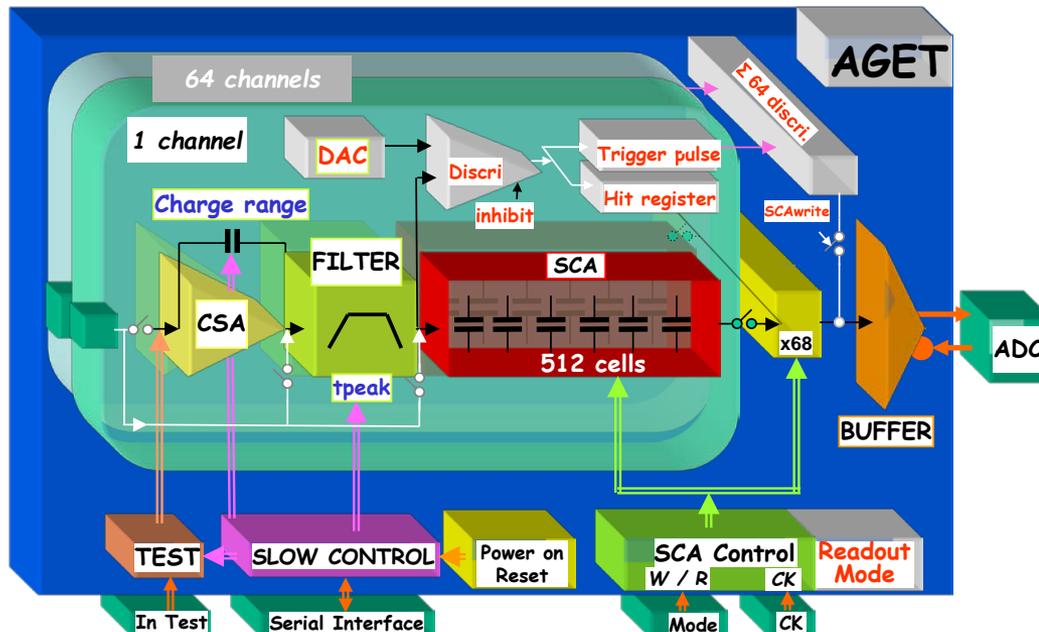
- 主に原子核実験で使うTPCを対象としたシステムだが、汎用性が高い
 - WireにもGEMにも使える
 - Pad by padで設定できるゲイン、シェーピングアンプ
- 汎用性が高い→あれもこれもできなければならない
- 実際SAMURAI-TPCを用いた実験は重イオン衝突実験のみならず、他の原子核実験にも応用が利く

- ただでさえ、欧米間のギャップがあるところでの開発で時間がかかるのに、安定したシステムとして確立し始めたのはプロジェクトが終わる頃だった。(正直まだR&Dが終わっているとは言えない)



Architecture

- 64 analog channels : CSA, Filter, SCA, Discriminator
- Auto triggering : discriminator + threshold (DAC)
- Multiplicity signal : analog OR of 64 discriminators
- Address of the hit channel(s); 3 SCA readout modes : all, hit or specific channels

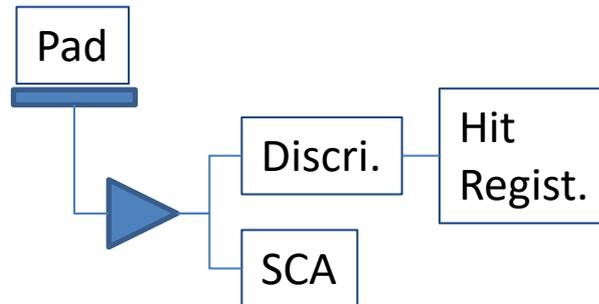


AMS CMOS 0,35 μm

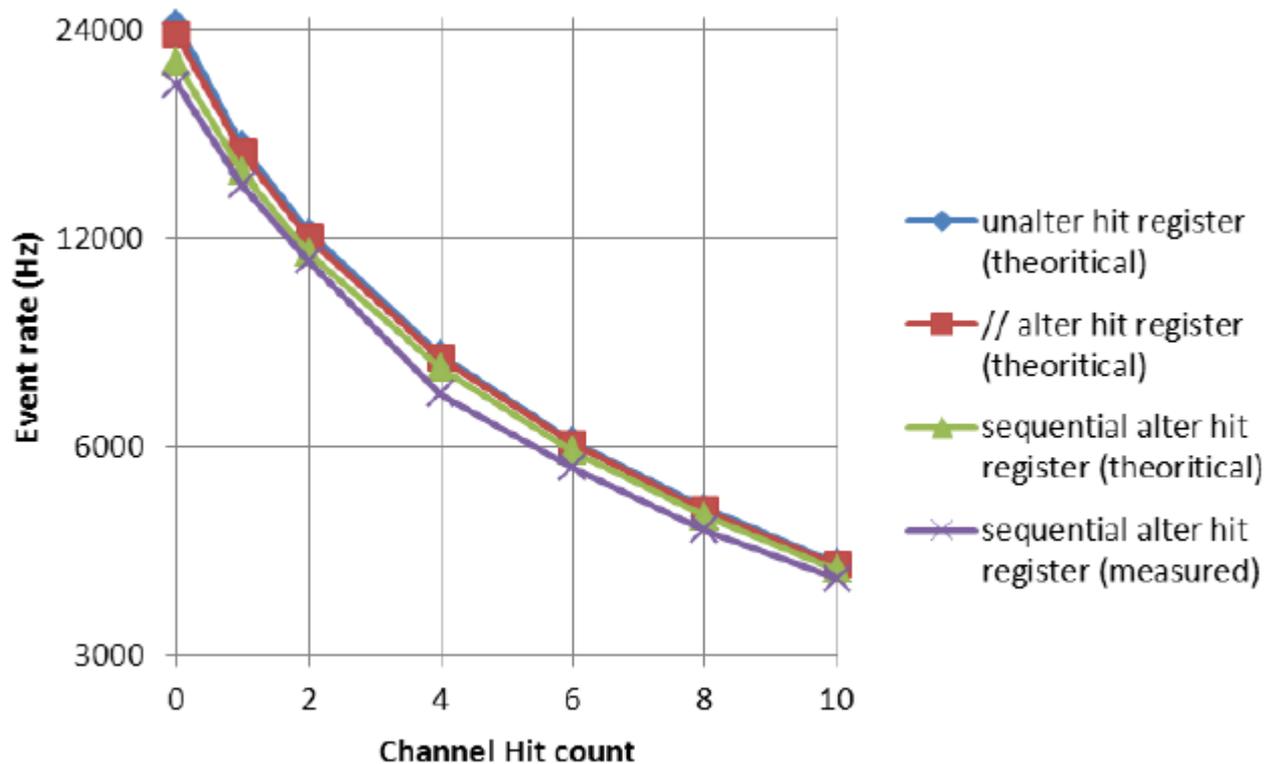
- 4 charge ranges/channel : 120 fC, 240 fC, 1 pC & 10 pC
- 16 peaking time values : 50 ns to 1 μs
- Fsampling : 1 MHz to 100 MHz
- Possibility to bypass the CSA and to enter directly into the filter or SCA inputs
- Input current polarity : positive or negative

2種類のzero-suppression

- デジタル-ゼロサプレス
 - Conversionされたデータに対し、閾値をかける→data reduction
- アナログ-ゼロサプレス:
 - Discriminatorでアナログ信号が閾値を超えたチャンネルだけADC→dead timeを短くする
 - 25MHz 1ch FADC for 68 channels
 - STAR-FEEの場合、ADCをch数分準備。10 μ sec conv. Time ADC for 1 SCA-cell: 512cell ADCに>5msec →電力消費が大きい



選択的digitization : DAQ rateの改善



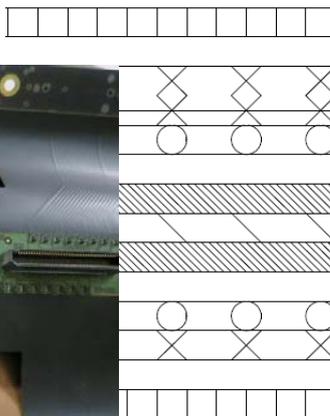
- ヒットがあったチャンネルのみDigitizeする。
 - Pedestalだけのチャンネルはdigitizaしない。
 - DACにかかる時間の短縮
- 例えば1ASIC(64ch)中8chヒットがあった場合は4500Hzでの読み出しが可能に

GETの導入：インターフェースの開発

- Analog部分からDAQ部分まで一貫したシステムとして開発されているが、以下を各計画ごとに開発する必要がある。
- TPCへの接続部 (protection + adapting connector)
 - ボード自体の形状 (限られた空間に入らなければいけない)
 - Noise/Gainに影響する
- DAQシステムの統合
 - 既に存在する検出器と組み合わせるには何かしらの方法で、データを統合する必要がある。
 - イベントID (common trigger) or Time stamp
 - Slowコントロールや、一部のモニタリングなど、共通部分は共同研究的に情報をやりとりできたが、独自の部分は開発する必要があった。
- 一つの大きなシステムとしてGETを採用したのは初例であり、人柱的なユーザーだった。
 - システムの深部を教えてもらえた。欲しい機能を導入してもらえた。



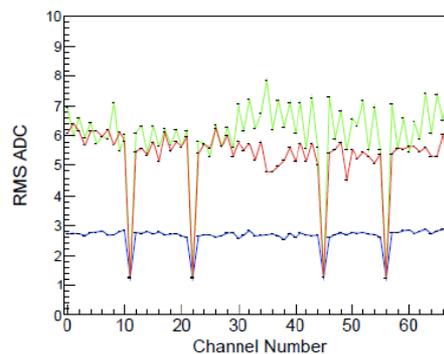
限られたスペースに回路を収納するために フレキシブル基盤を作ったが: 逆にノイズ源に



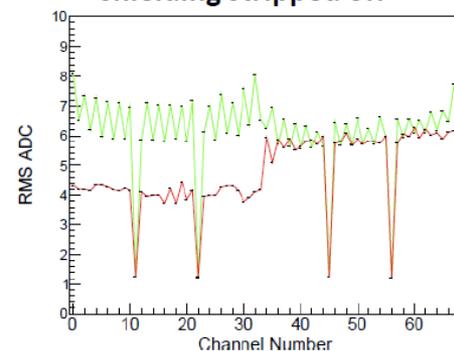
- L1補強板: ガラエポ 500 μ m
- 接着剤: 熱硬化性接着剤 40 μ m
- L1銀シールド: 22 μ m **Ag shield**
- L1レジスト
- L1カバーレイ: ポリイミド 12.5 μ m **polyimide**
- 接着層: 25 μ m **gluing layer**
- L1圧延銅箔: 18 μ m + 銅めつき: 10 μ m **Cu plate+overlay**
- ベース: ポリイミド 50 μ m **polyimide**
- L2圧延銅箔: 18 μ m + 銅めつき: 10 μ m
- 接着層: 25 μ m
- L2カバーレイ: ポリイミド 12.5 μ m
- L2銀シールド: 22 μ m
- 接着剤: 熱硬化性接着剤 40 μ m
- L2補強板: ガラエポ 500 μ m

GET+ZAP+TPC

(1) Full ZAP



(2) 1st 34ch have ZAP shielding stripped off



ZAP has Ag shield layer which increases the ZAP capacitance: Remove Ag layer \rightarrow Reduce C_{in} \rightarrow Reduce noise

| | GET | GET + ZAP | GET + ZAP + TPC |
|-----------------------------|------|-----------|-----------------|
| (1) RMS ADC w/ full ZAP | 2.55 | 6.37 | 5.31 |
| (2) RMS ADC w/ stripped ZAP | - | 5.85 | 4.02 |

120fC, 233nsec

読み出し回路の取り付け作業 (Dec. 2014 ~ Feb. 2015)

- 半分取り付けたところでシリアスな問題が見つかり、取り外してフランスへ送り返すことに

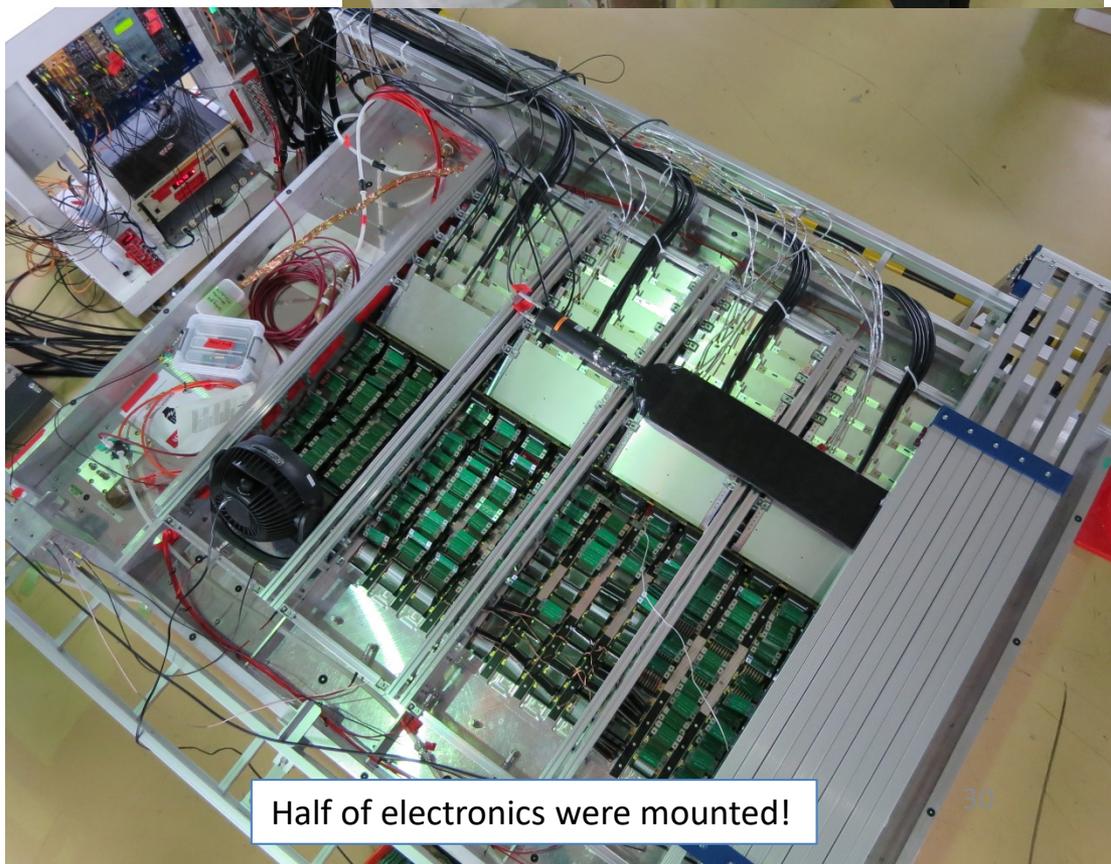
Checking the connection one board by one board.



Gluing spacer one by one.

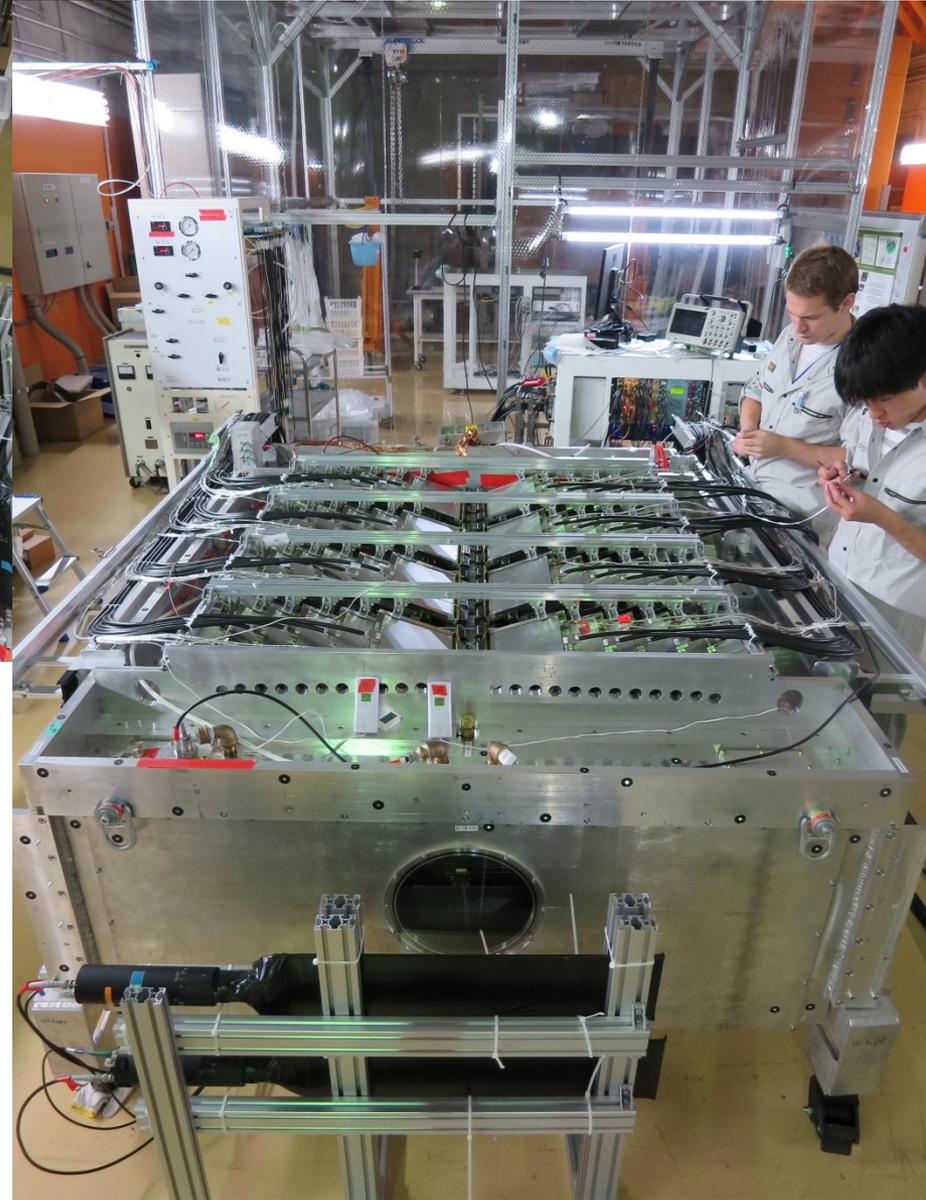
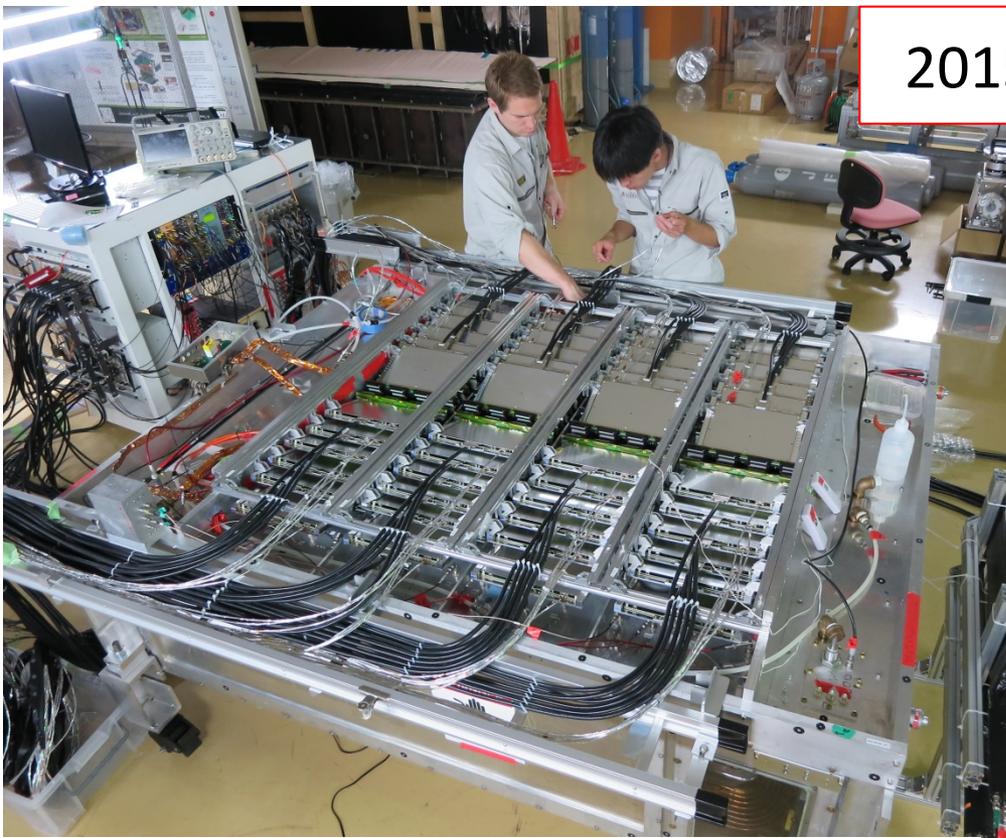


Connecting 384 boards.

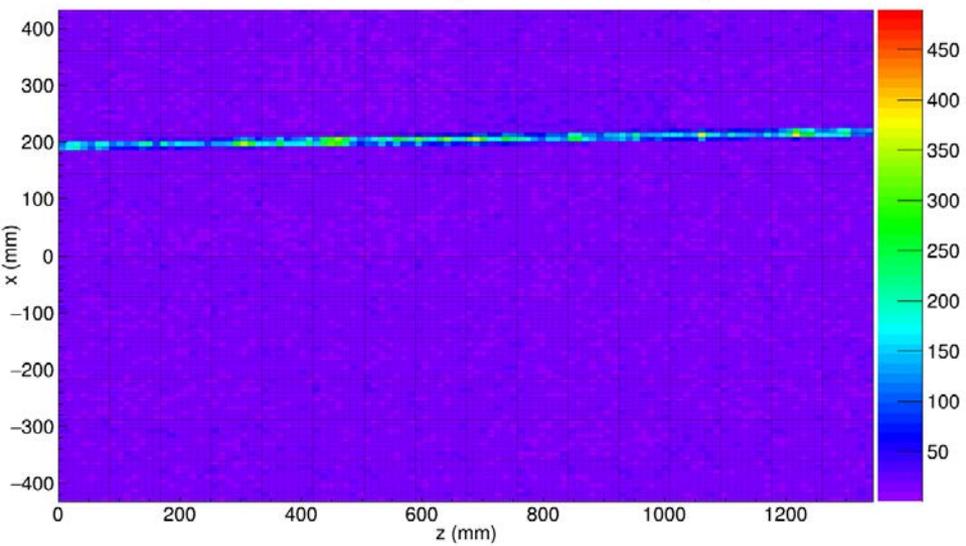


Half of electronics were mounted!

2015年8月に読み出し回路設置完了



Event ID: 152 (Gain not calibrated)



SPiRIT用DAQシステム

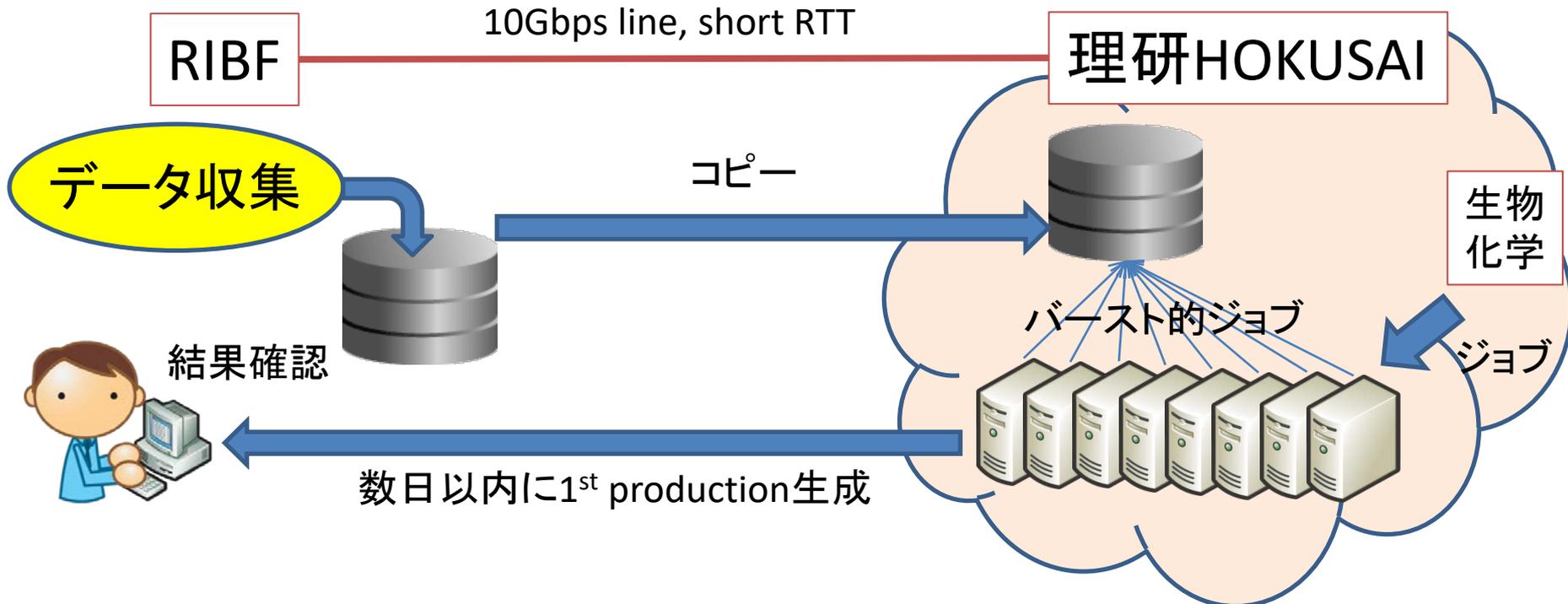
- 通常のRIBF実験におけるデータサイズ：数Tbyte/1実験：1HDD/1実験
- 1実験はだいたい1週間くらい
- Triggerはできるだけ、BiasがMinimumに。

- 我々の場合は、そのデータサイズが大きい
- 10MByte/eve w/o zero-suppress
 - Trigger rate 1kHzだとすると、10GByte/secだがネットワーク上の制限により、最大1.2GByte/sec
 - w/o zero-suppressの場合はDAQ rate最大100Hz
- 0.1kByte/eve w/ zero-suppress
 - この場合は数kHzまでいける
- いずれにせよデスクトップマシンではもう無理
 - 理研計算機センターにて解析

← まだ不完全

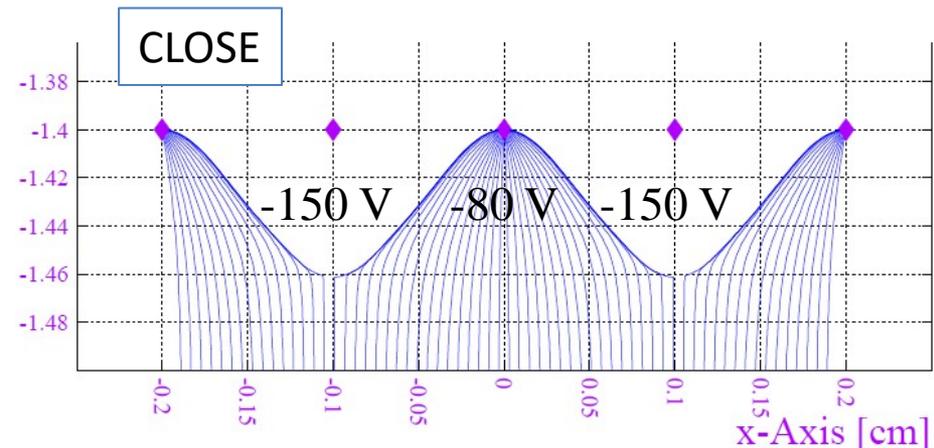
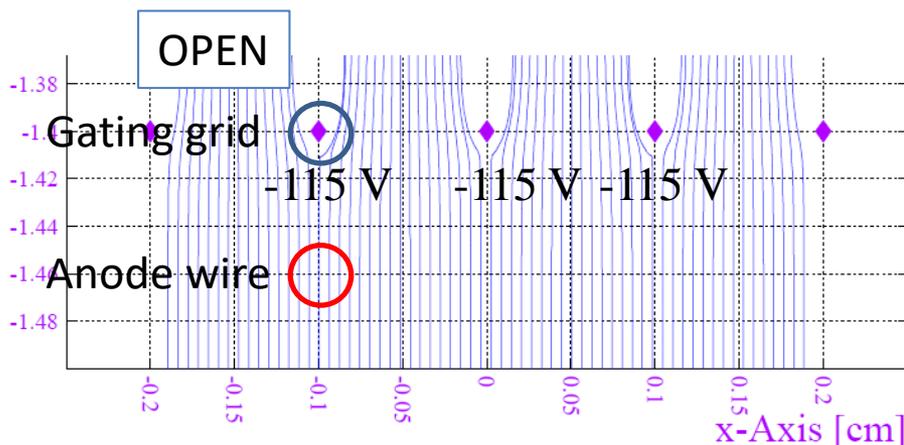
理研計算機センターの一部へ ～戸建てからマンションの一室へ～

- 実験データ生成レート: 300MB/sec (1.2TB Max)
- 個人レベルではComputingインフラの増強にも限界がある
 - これまではworkしていた
- 理研計算機センターへ計算処理を集める
 - 必要な時にバースト的計算処理(クラウド的インフラ)
 - HOKUSAI:京の10分の1程度の処理能力を持つ次期システム



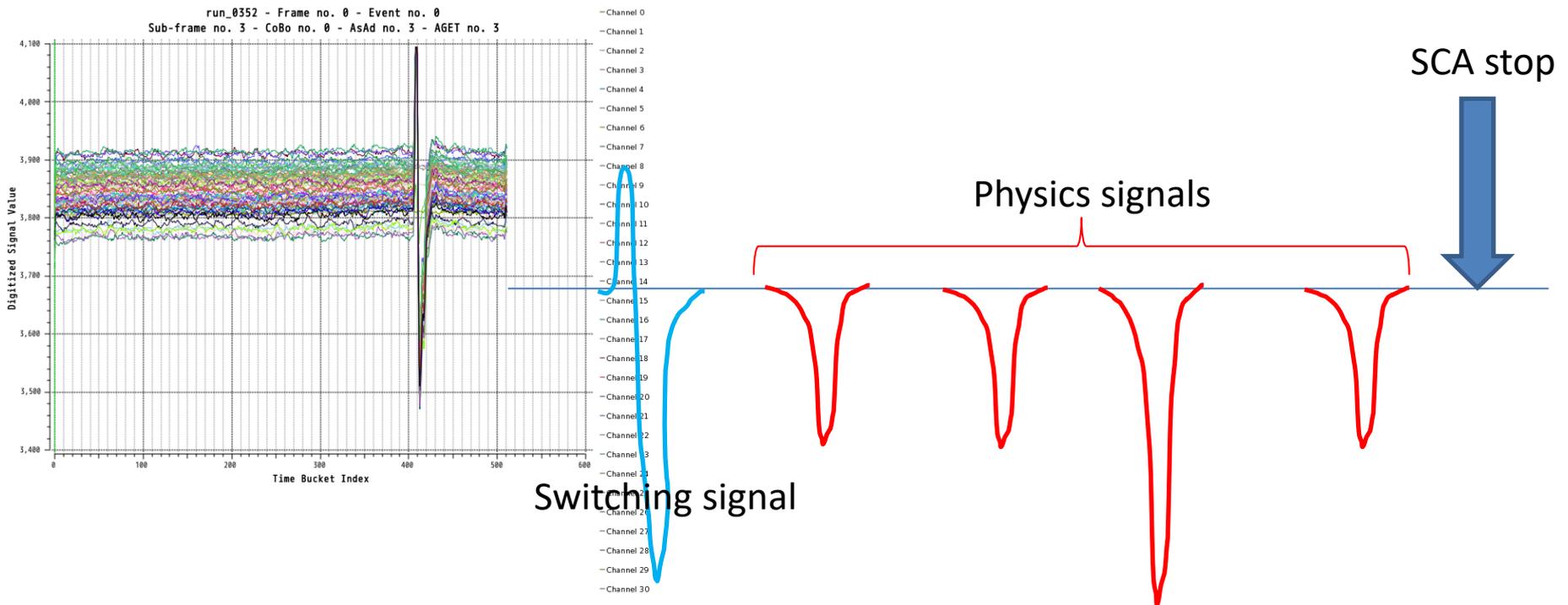
ゲーティンググリッド機構の開発

- RI beam of 300MeV/u ^{132}Sn
 - Total beam rate: 10kHz, Purity: 50%
 - Trigger rate 10~100Hz
 - 9900Hz beam is useless and causes trouble on detector.
 - Gain attenuation, field distortion.
- Employment of Gating grid:
- Ion does not go to amplification region.
 - Ion feed back does not come back to drift region.



ゲーティンググリッドスイッチングにより、 Selective readoutができない

- チャンネルごとのディスクリにより、どのチャンネルをdigitizeするか選択する。
 - ゲーティンググリッドOPEN/CLOSEは大きなスパイクノイズを作る。
 - 常にディスクリから出力が出てしまう。
- 全てのチャンネルがfireされ、結局すべてのチャンネルがdigitizeされてしまう。

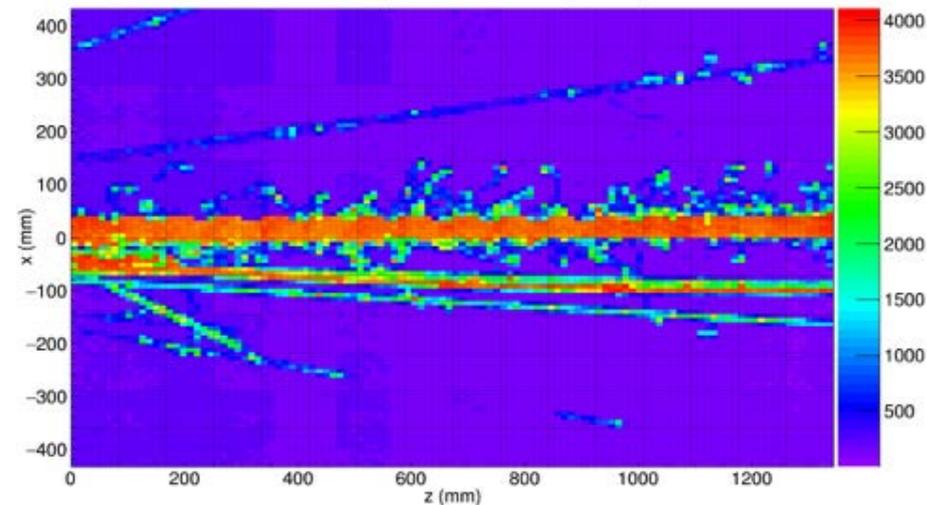


run 946

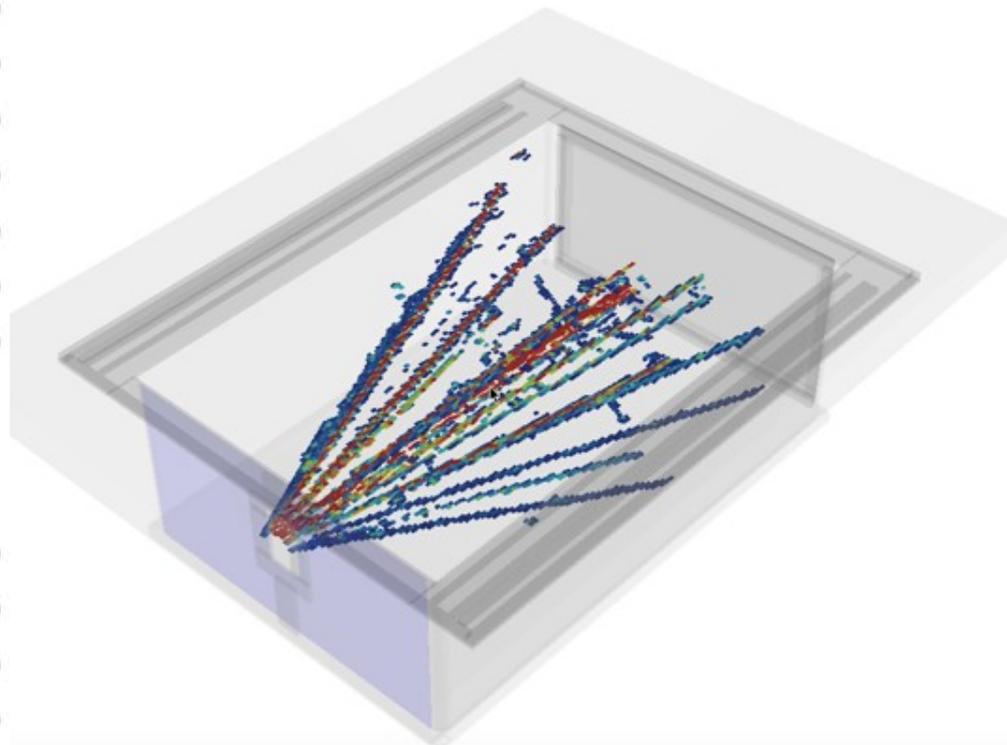
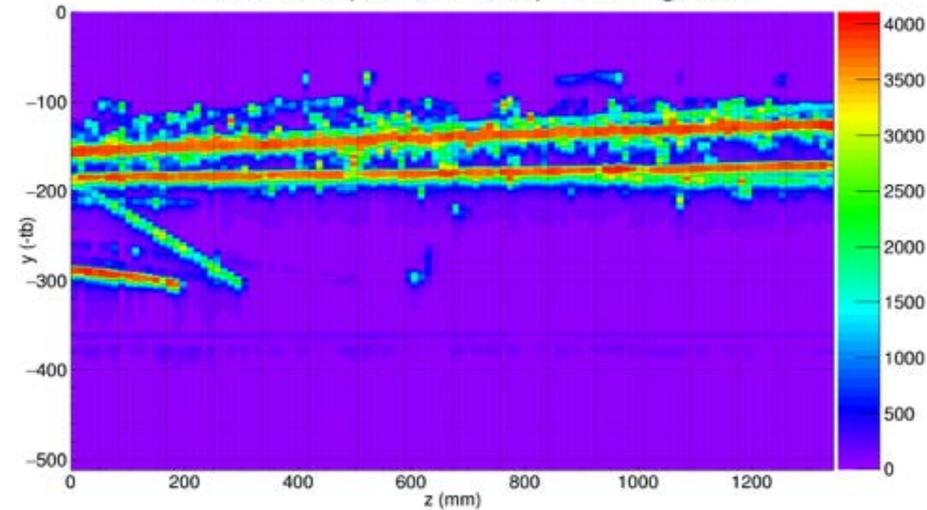
9 mm Al target
Kyoto array out

実際のRIビームを使った試運転 一応きちんと動いている様だった

Event ID: 12 (Gain calibrated) - Top view



Event ID: 12 (Gain calibrated) - Beam right view



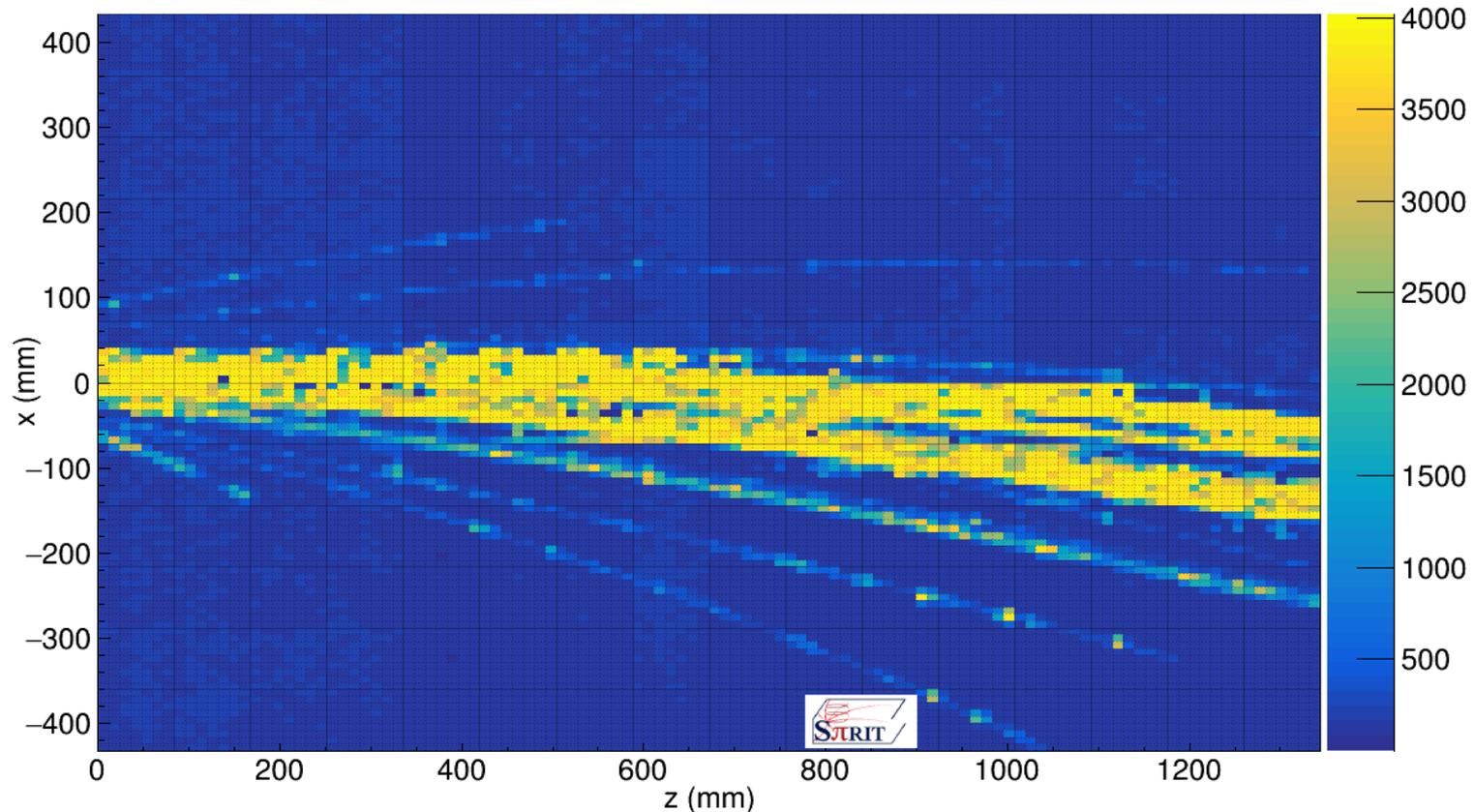
run 928

9 mm Al target
Kyoto array $M \geq 2$

その他: 重イオンによる巨大なチャージが入ると複数のpadに信号がspread

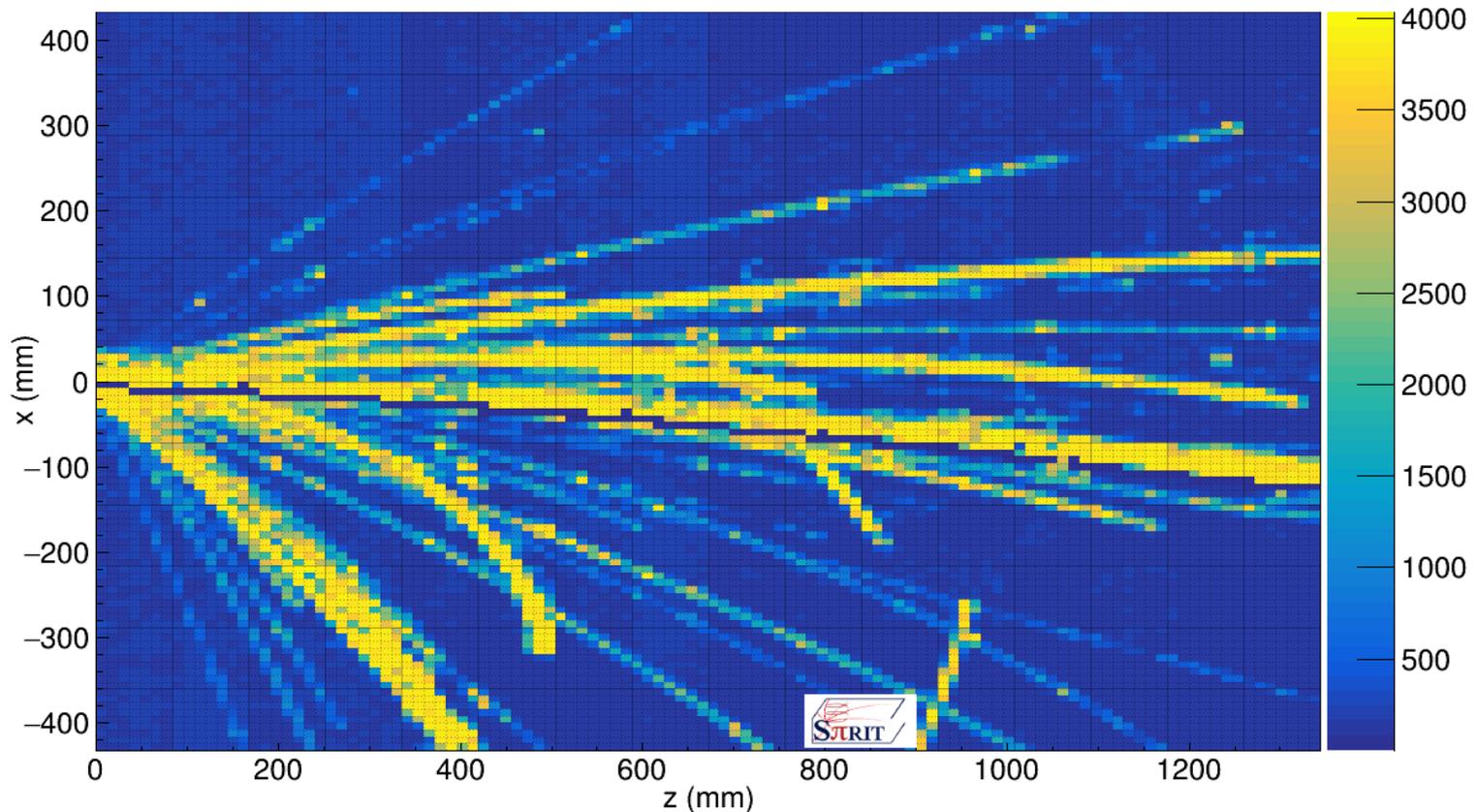
- Saturation effectと呼ばれるもの

Run#1818 - Event ID: 6 (Gain not calibrated) - Top view



その他: 巨大なチャージが入ると該当 padがしばらくdeadに

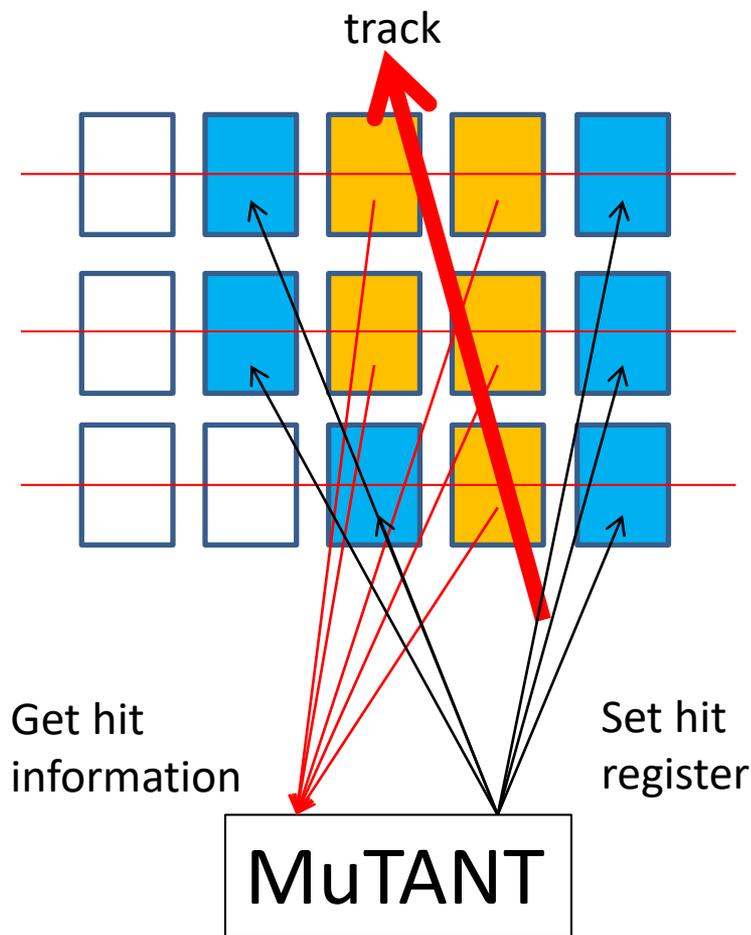
Run#1818 - Event ID: 39 (Gain not calibrated) - Top view



電荷アンプからの出力がsaturateするため

近い将来の改良点

Hit pattern registerを故意に操作する



- MuTANT Triggerモジュールにより、故意にselective digitizeするチャンネルを広げる
- ディスクリの閾値設定がルーズで良くなる
 - ヒット位置を計算する上では大きい信号が見えるパッドとその周辺のパッドの波高を見る必要がある
 - 周辺のパッドに見える信号は小さく、ディスクリの閾値設定がシビア
- 故意にhit registerを操作するのを2msec以内に完了しなければならない
 - それ以降はSCA中のアナログ情報をロスする

まとめ

- 理研RIBFにて、重イオン衝突実験用時間射影型3次元を構築した。
 - GET汎用読み出しシステムを導入
 - 2016年春期に磁場中での試運転後、物理ラン
- 強固な実験インフラが求められる一方で、そのリソースの供給源は限られる→理研スパコンの利用
- 高レート、ワイドダイナミックレンジでの読み出しに向けて、study中