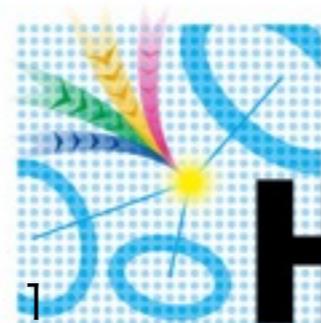
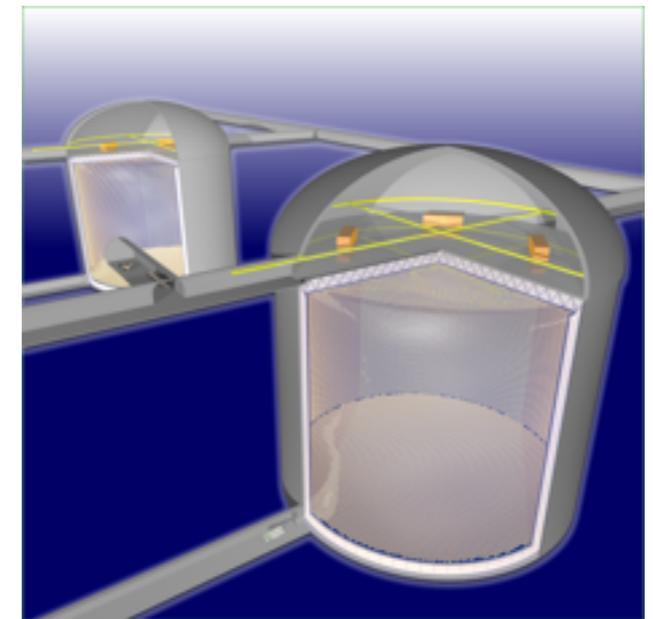


ハイパーカミオカンデにおける DAQネットワークの可能性

2016/03/02

東京大学ICRR神岡 園田祐太郎
ICEPP Symposium @ 白馬

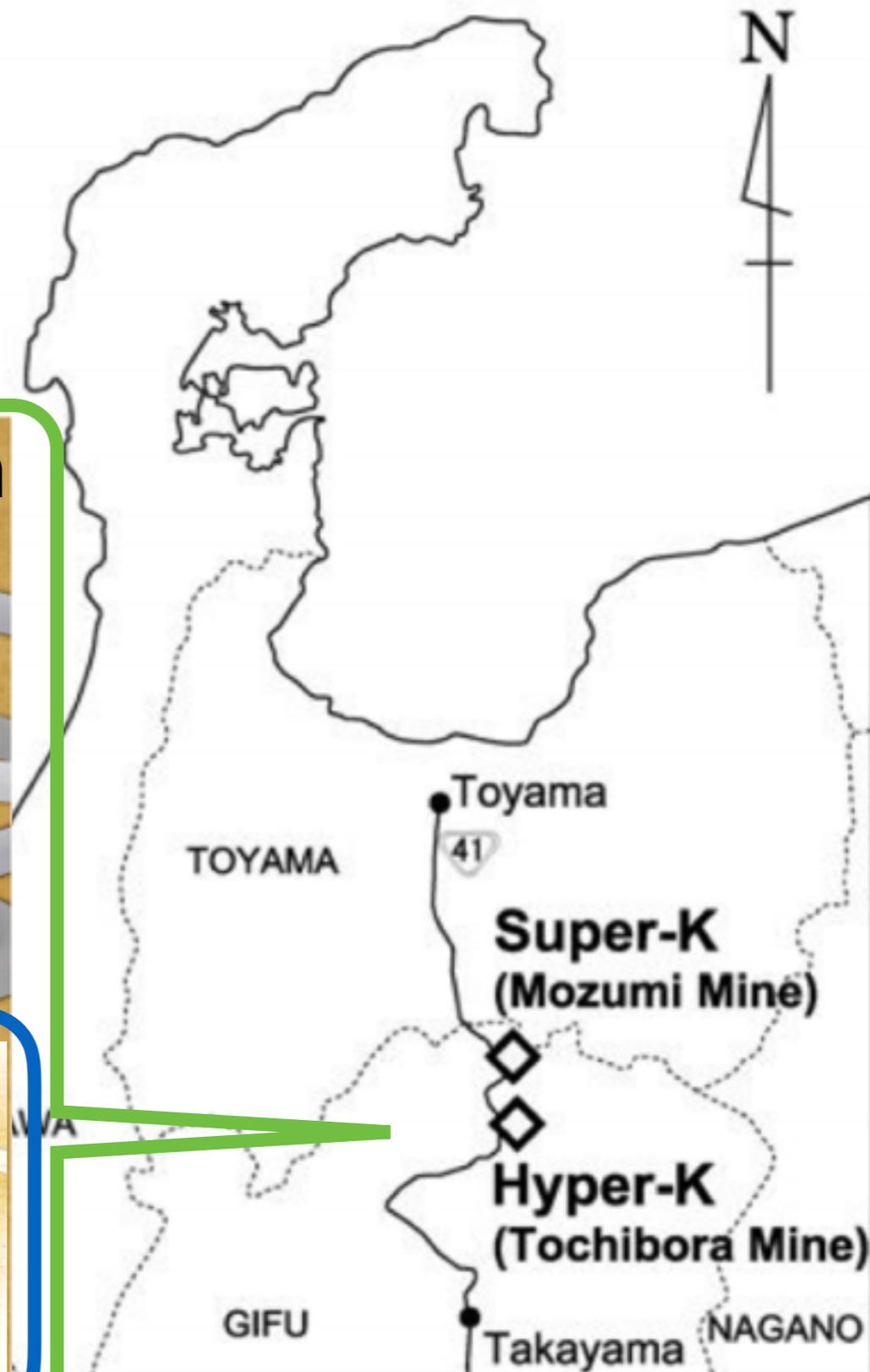
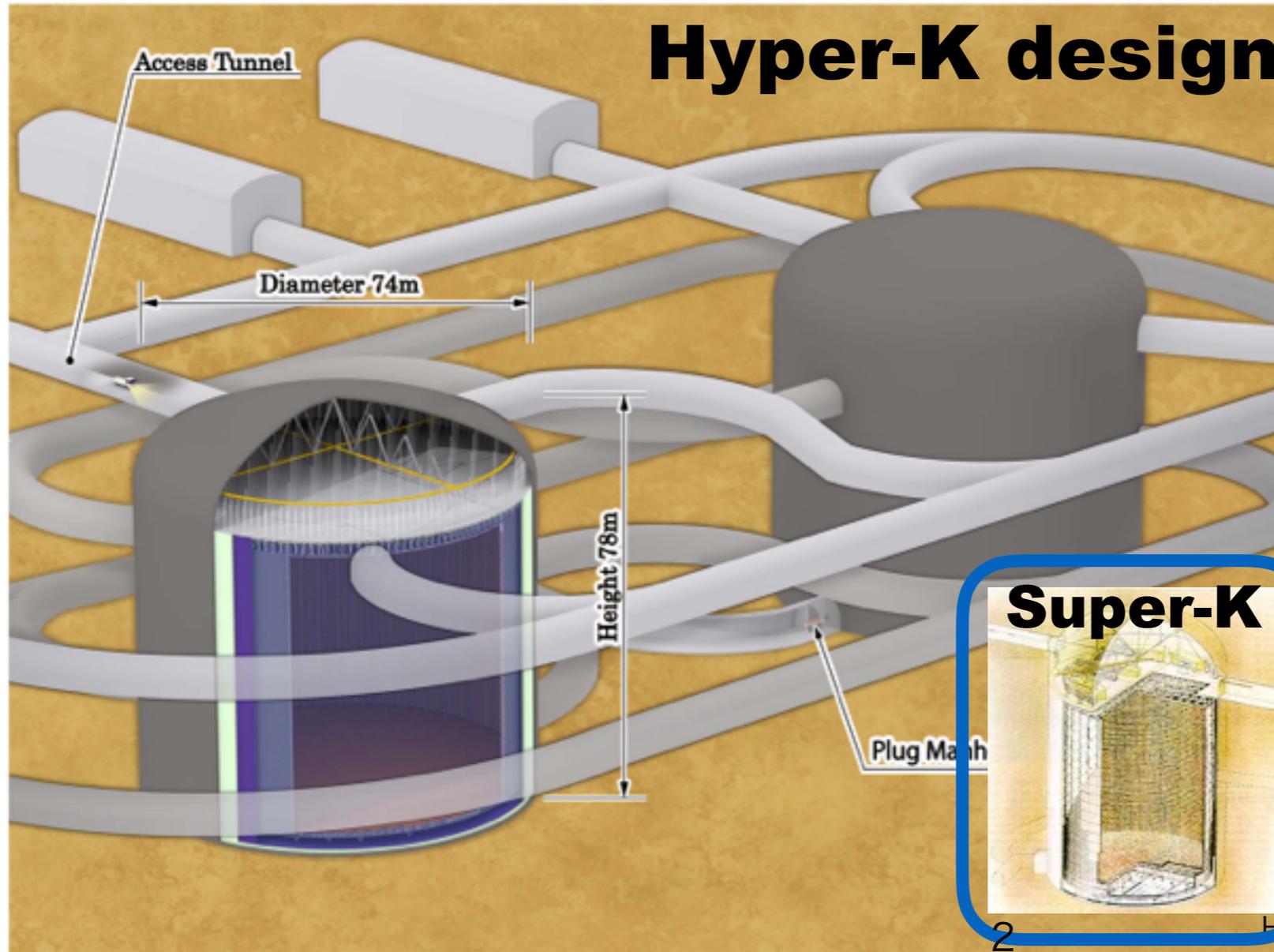


Hyper-Kamiokande

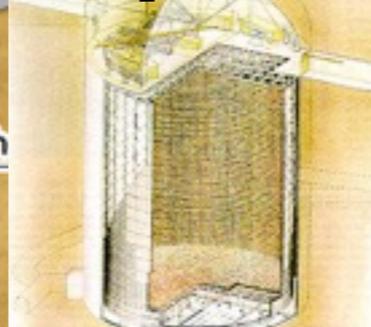
Hyper-Kamiokande

	Hyper-K	Super-K
Tank	2	1
Dimension	74m ϕ \times 60m	39m ϕ \times 42m
ID PMT数	40,000 \times 2	11,129

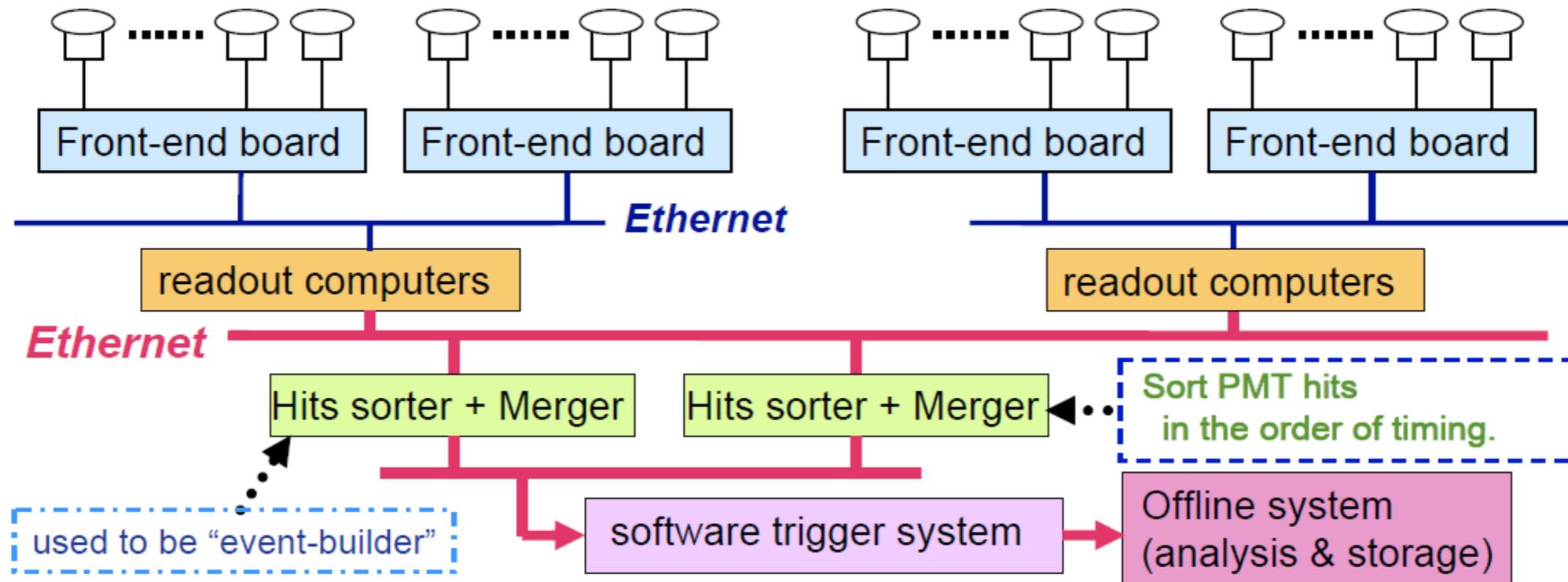
Hyper-K design



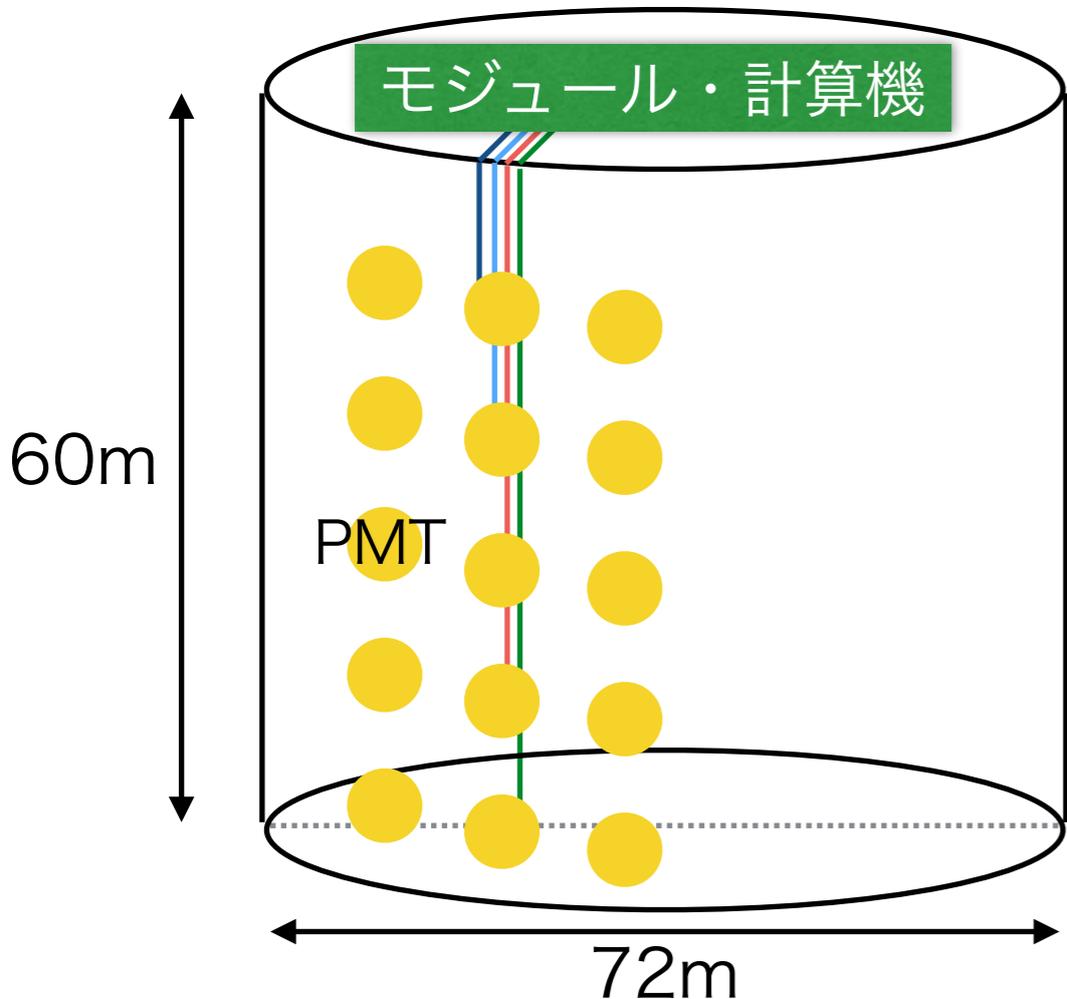
Super-K



DAQネットワーク @ Hyper-Kamiokande



~Current SK Model~

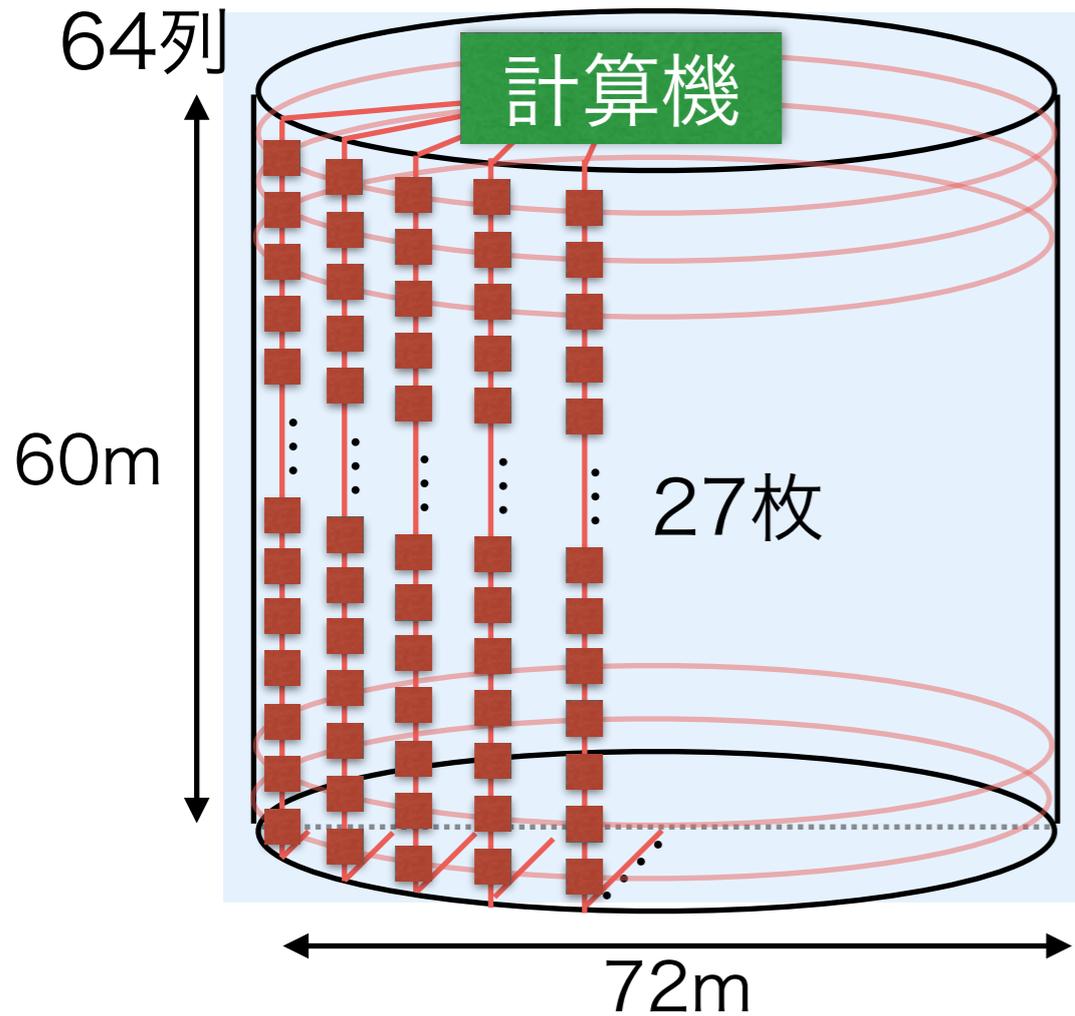


- ・ PMTのアナログ信号（時間・電荷）はフロントエンドモジュールにて連続的にデジタル化される
- ・ モジュールでデジタル化されたすべてのヒットデータは読み出し計算機に集められる
- ・ ソフトウェアトリガーによってイベントを決定し、オフラインシステムへ転送する

タンクが大きいいため、
タンク上部までケーブルを引くことが難しい
(アナログ信号の減衰・ケーブルの総重量)

モジュールネットワーク

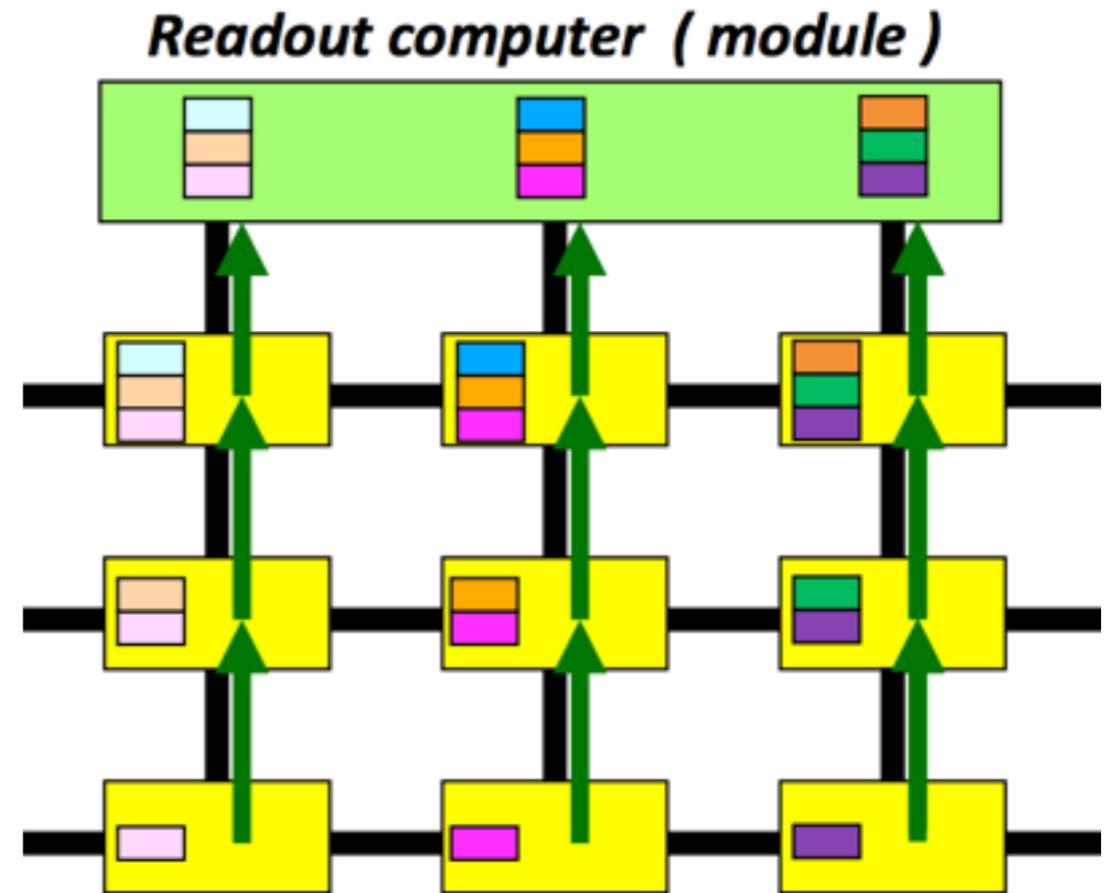
モジュールは水中に沈める



ルーティング機能

障害耐性の強い
確実な転送を実現する

Possible module connections



【メリット】

- ・ ケーブル重量を軽くできる
- ・ 信号が劣化しにくい

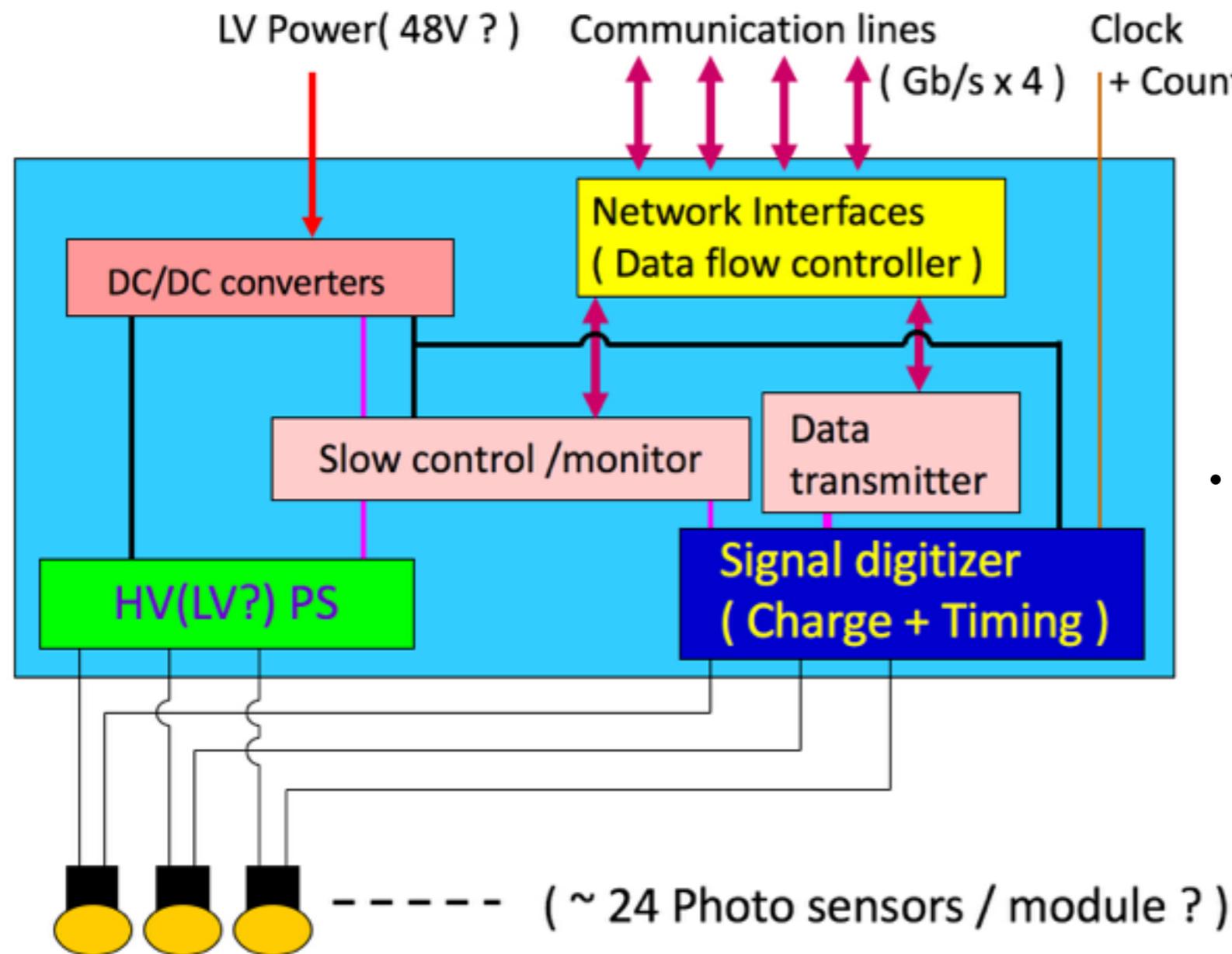
【デメリット】

- ・ メンテナンスが困難 (20年運用を予定)

フロントエンドモジュール

PMT 1 hit あたり 6Byte × ダークレート 10kHz × 24 ch

⇒ データ転送量：1モジュールあたり 1.4MB/s



通信帯域の技術的な制限

- 10Gbpsに対応する高速FPGAやPHYが少ない
- 光モジュール等の発熱が大きい
- 到達長が短い



1Gbpsが現実的
(約90モジュール相当)

Typical value

Ethernet (Cable)

UTP



10GBASE-T

Fiber



10GBASE-LR

LifeTime

~ 20 years

(SKでの実績あり、信頼度高)

10 ~ 20 years

(現行品の寿命：約9年)

Cost

10,000 JPY / 100m

50,000 JPY / 100m

Length

~ 100m

300m ~ 0(km)

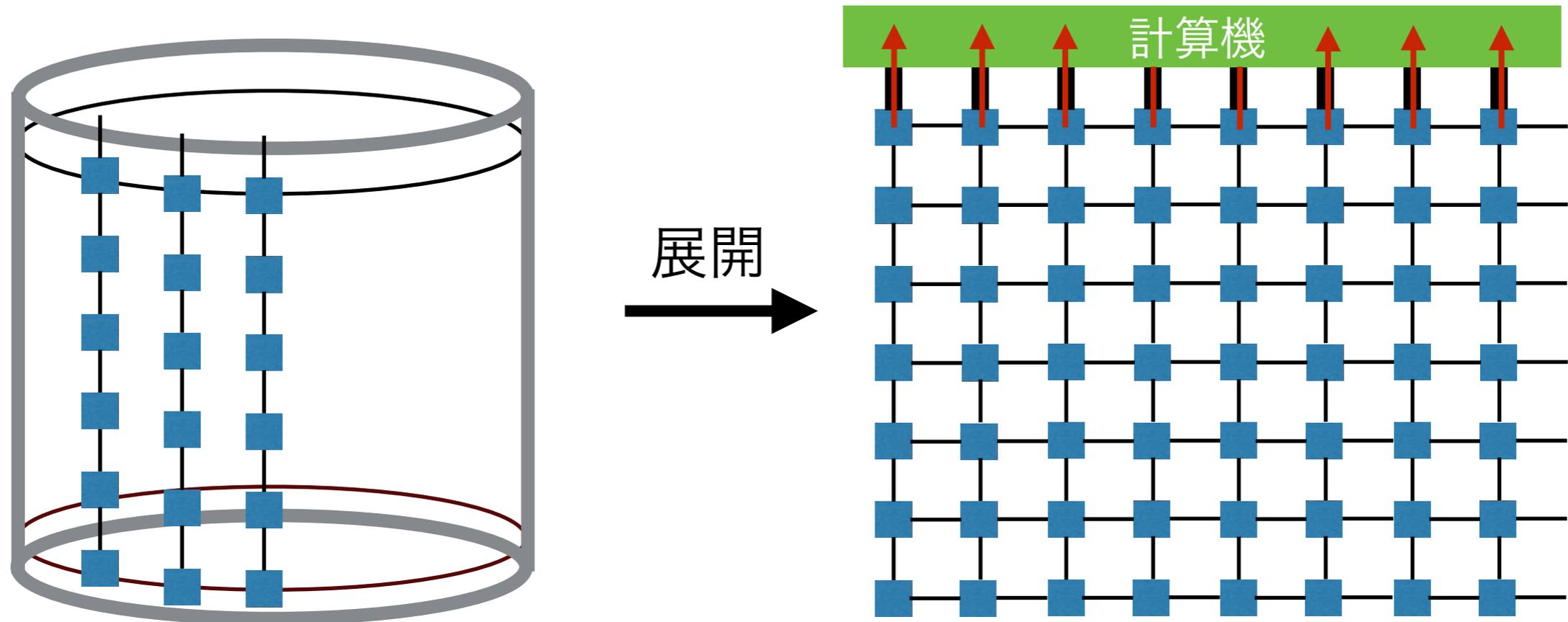
考えられる故障...

ケーブル：断線、被覆の劣化、ソケット劣化による故障

モジュール：ネットワーク部、ADC部の故障

1枚が故障したことによる大量のデータ損失を避ける

Routing -Rule-

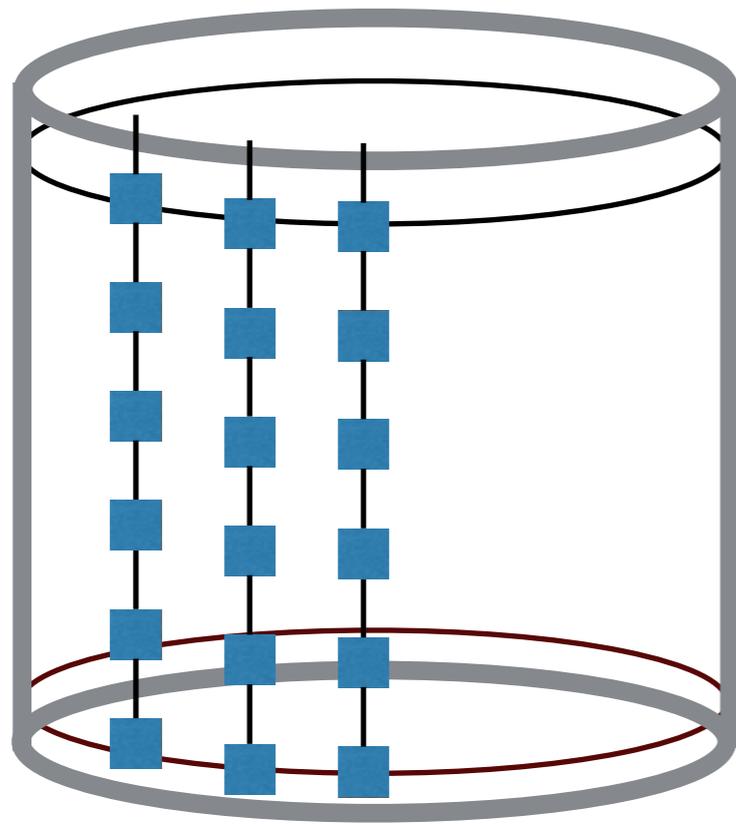


複雑な処理を要するルーティングは避けたい

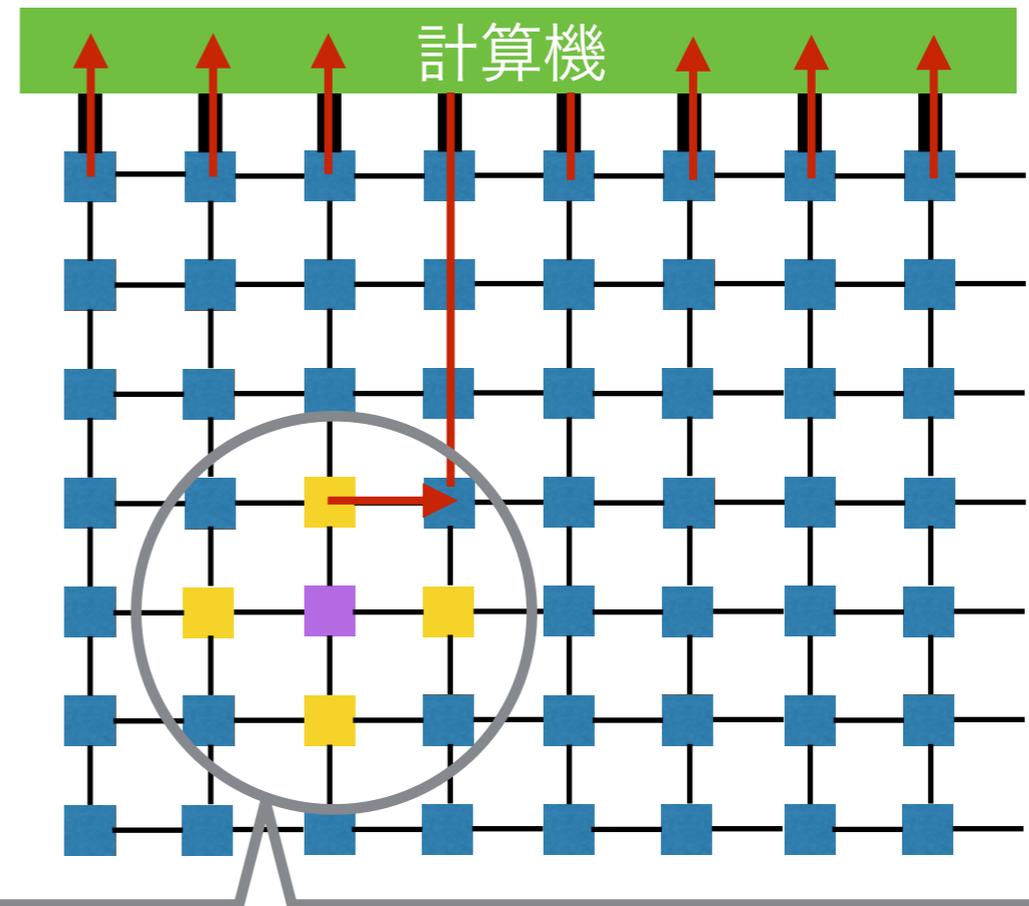
Step 1

最上部のモジュールは計算機につながっているとするとする
各モジュールを上から起動する

Routing -Rule-

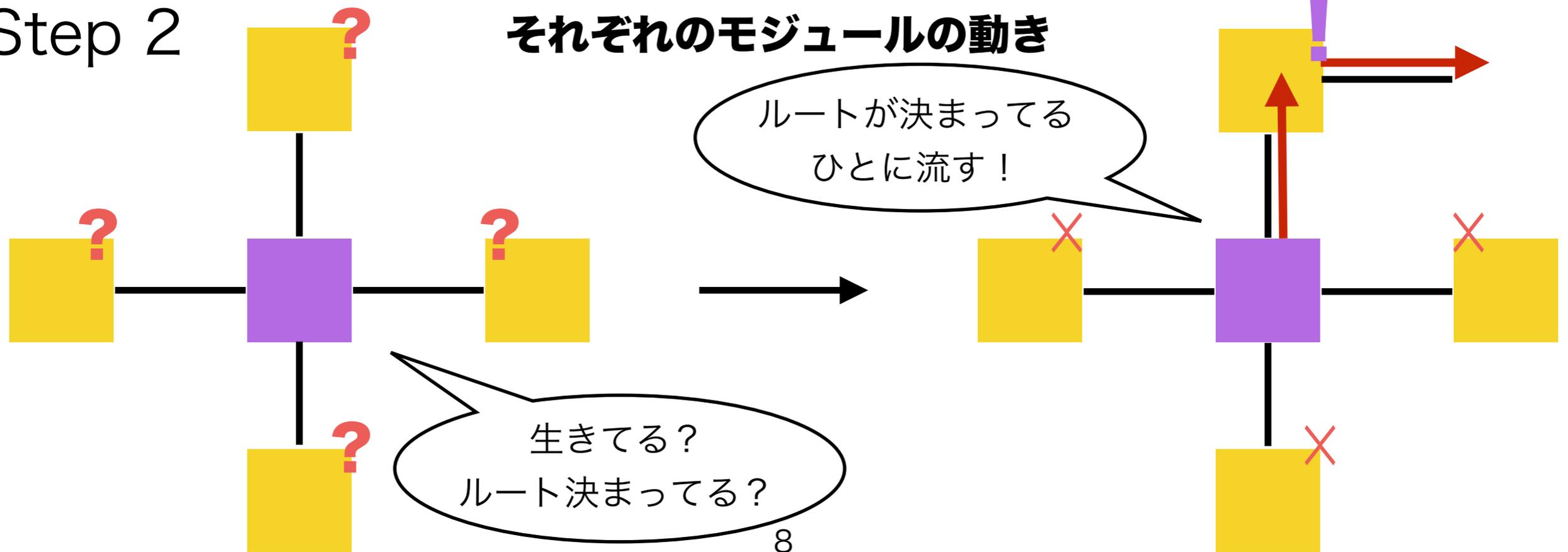


展開
→



Step 2

それぞれのモジュールの動き



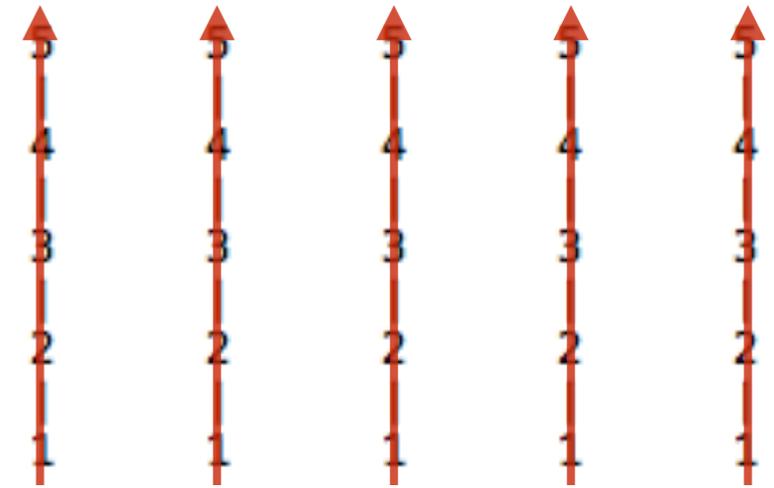
Routing

通常状態(5 × 5)

計算機



計算機



ケーブル断線状態(5 × 5)

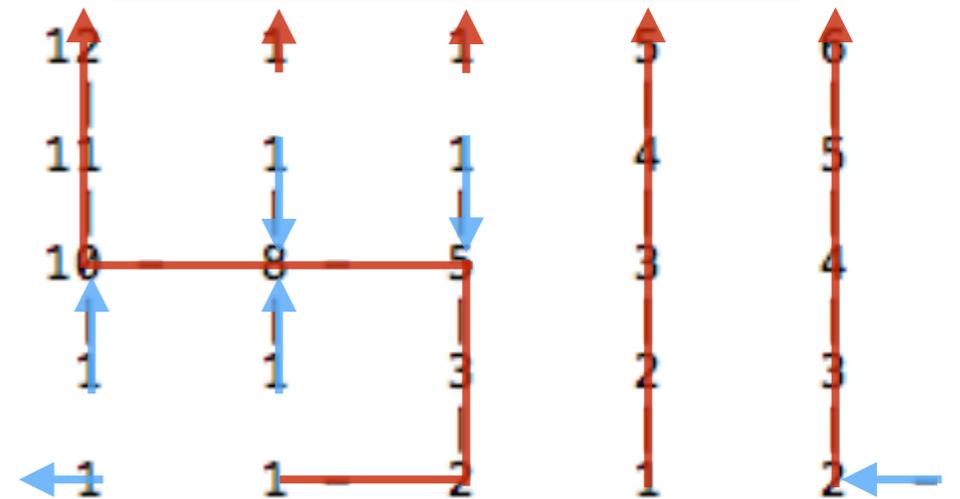
計算機



(縦横4本ずつ断線)



計算機



Simulation

【実際のスケール】

- ・ 縦27行 × 横64列

⇒ IDのほぼ実際のスケールに相当

(モジュール数1728個 : PMT数41472本)

Current SK (8 years)

Cable : 0 /550

QBEE : 16/550



~ **1%**

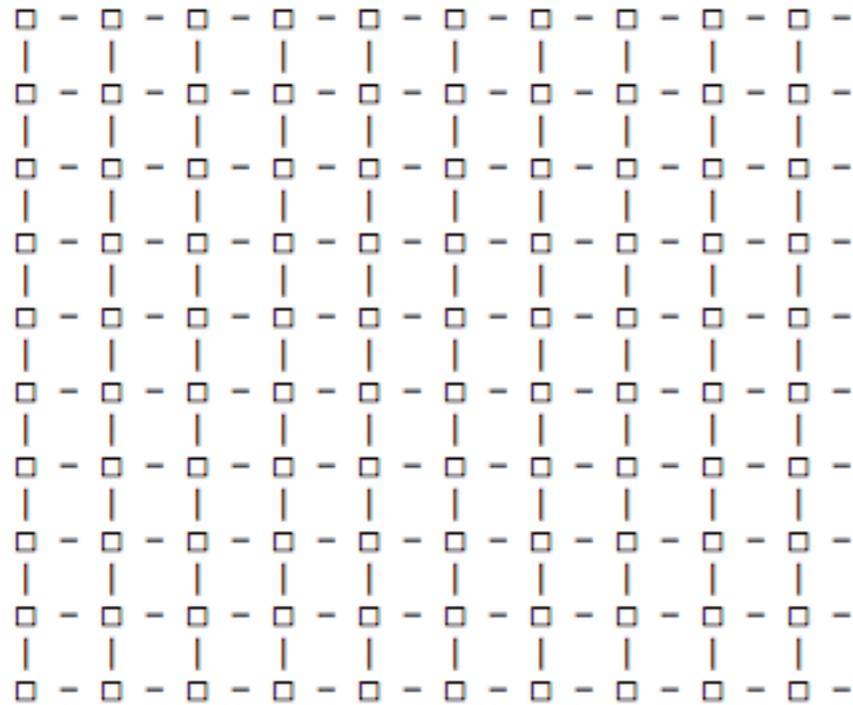
【シミュレーション条件】

- ・ 縦、横のケーブルが全体の10%の割合で切断されている状態でルーティング

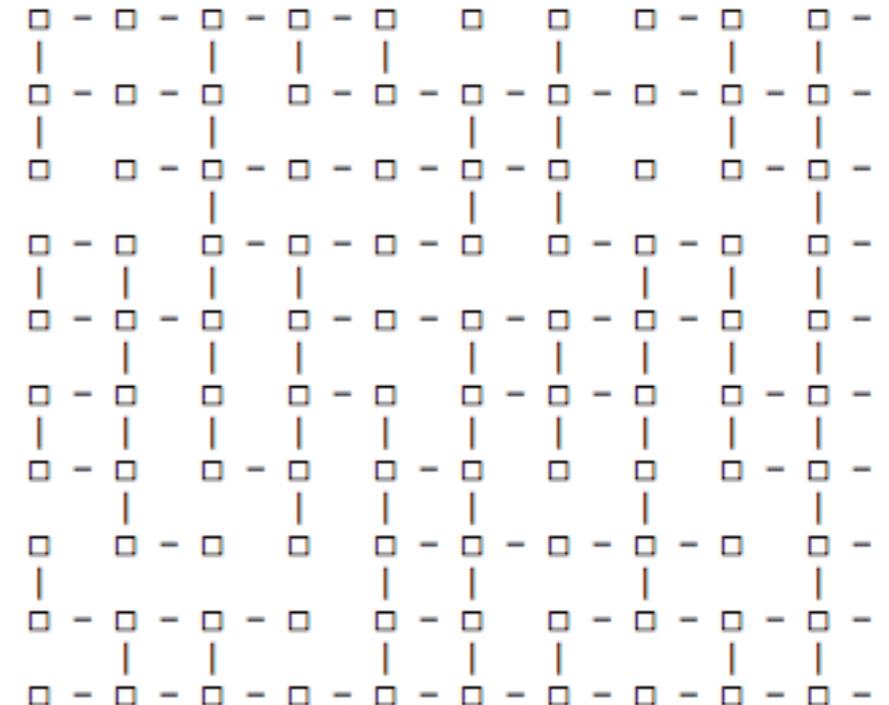
⇒ 最終的にどのくらい障害が起きたときの運用可能性を見積もる

Q. SKのいままでの運用では、ケーブル断線はないのでは？
Q. 10% が一体どういう状況に対応している？

10×10

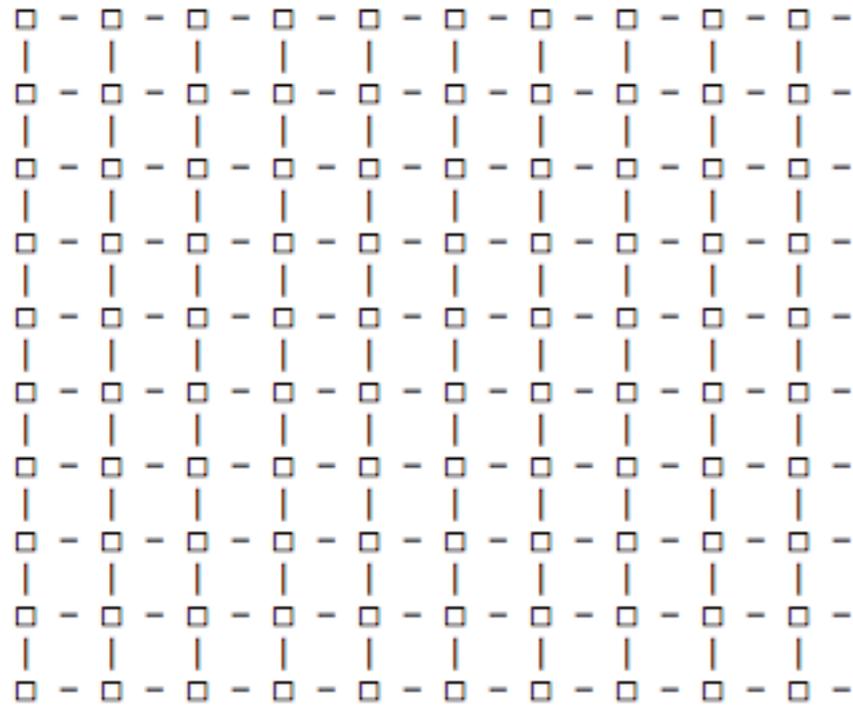


30%断線

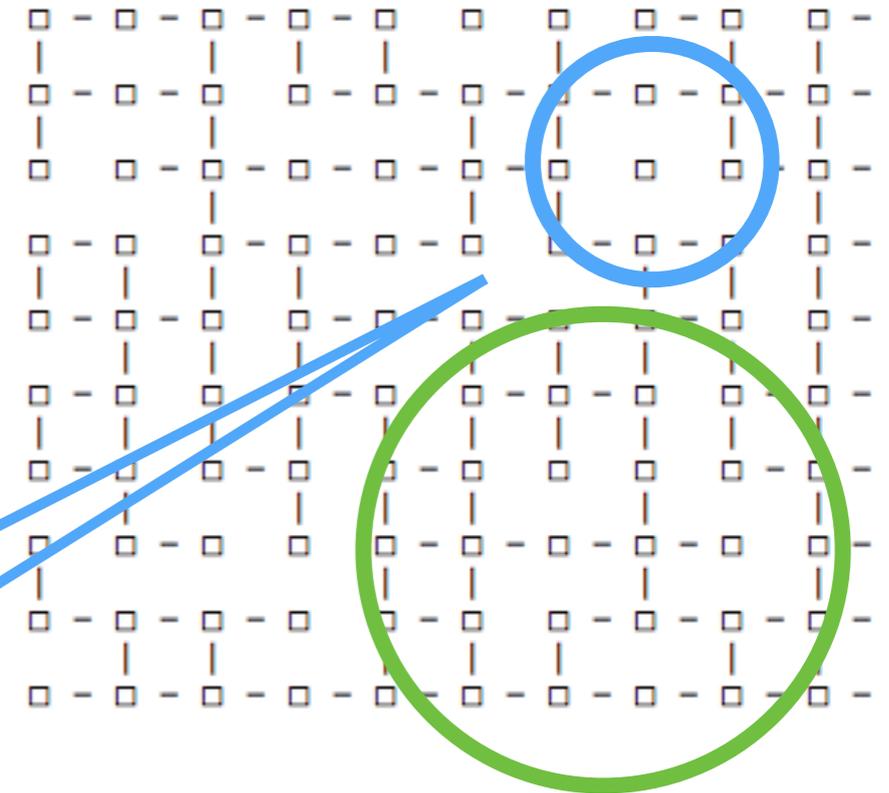


Q. SKのいままでの運用では、ケーブル断線はないのでは？
Q. 10% が一体どういう状況に対応している？

10×10



30%断線



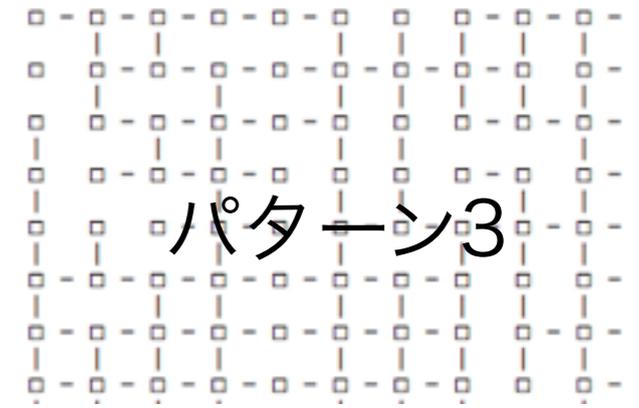
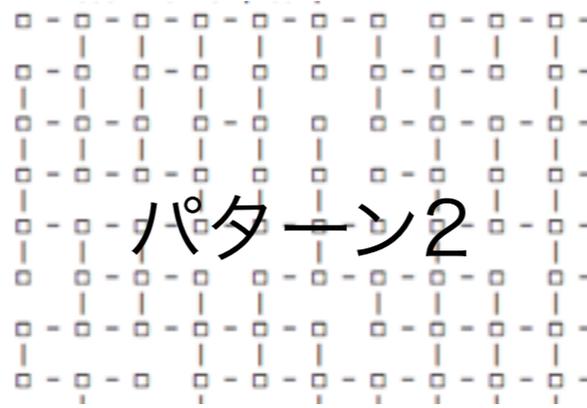
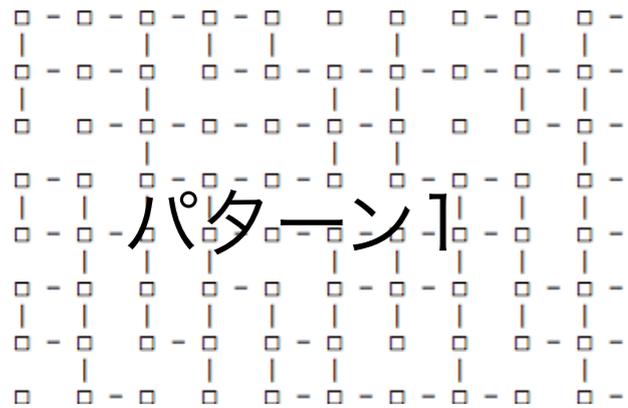
モジュール故障のように
見える

単純なケーブル断線

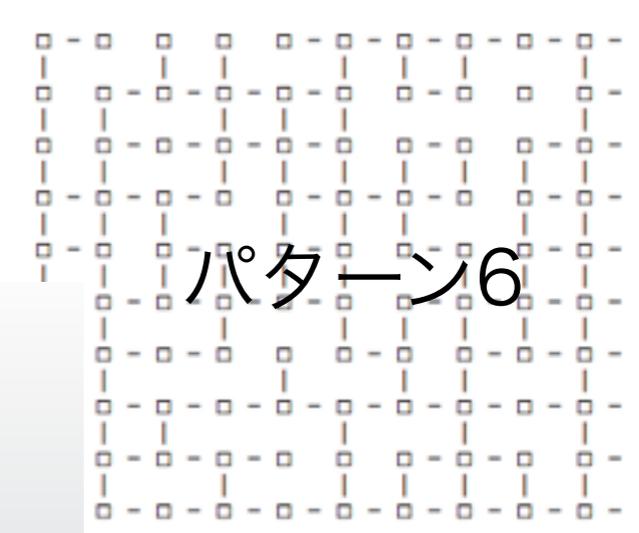
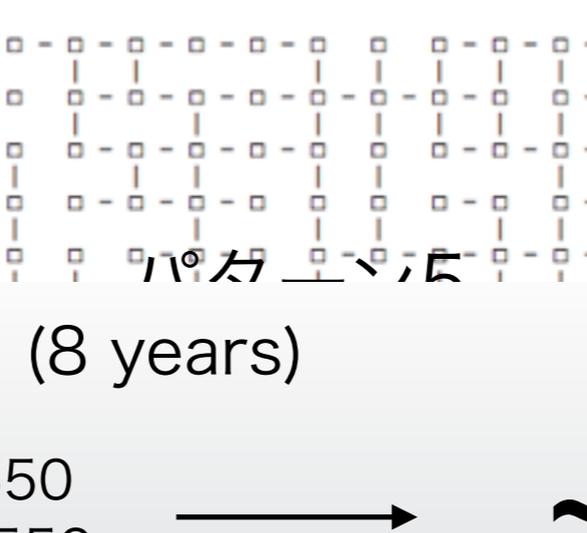
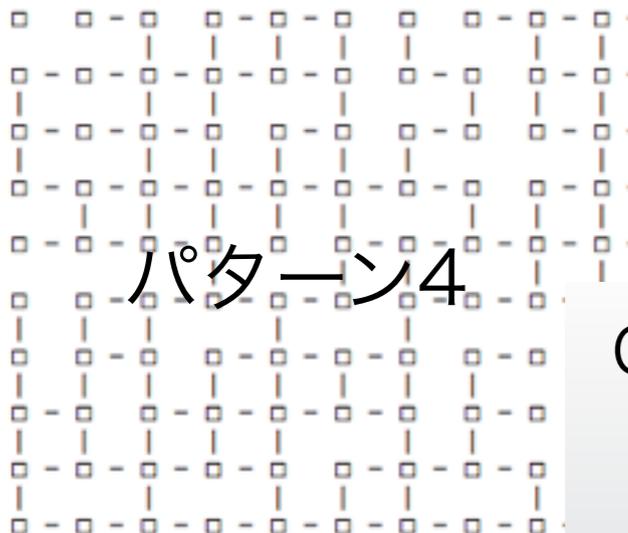
Q. SKのいままでの運用では、ケーブル断線はないのでは？

Q. 10% が一体どういう状況に対応している？

10×10 (30%断線)



**ケーブル断線、モジュール故障の両方の
様々なシチュエーションを作り出すことができる**



Current SK (8 years)

Cable : 0 /550

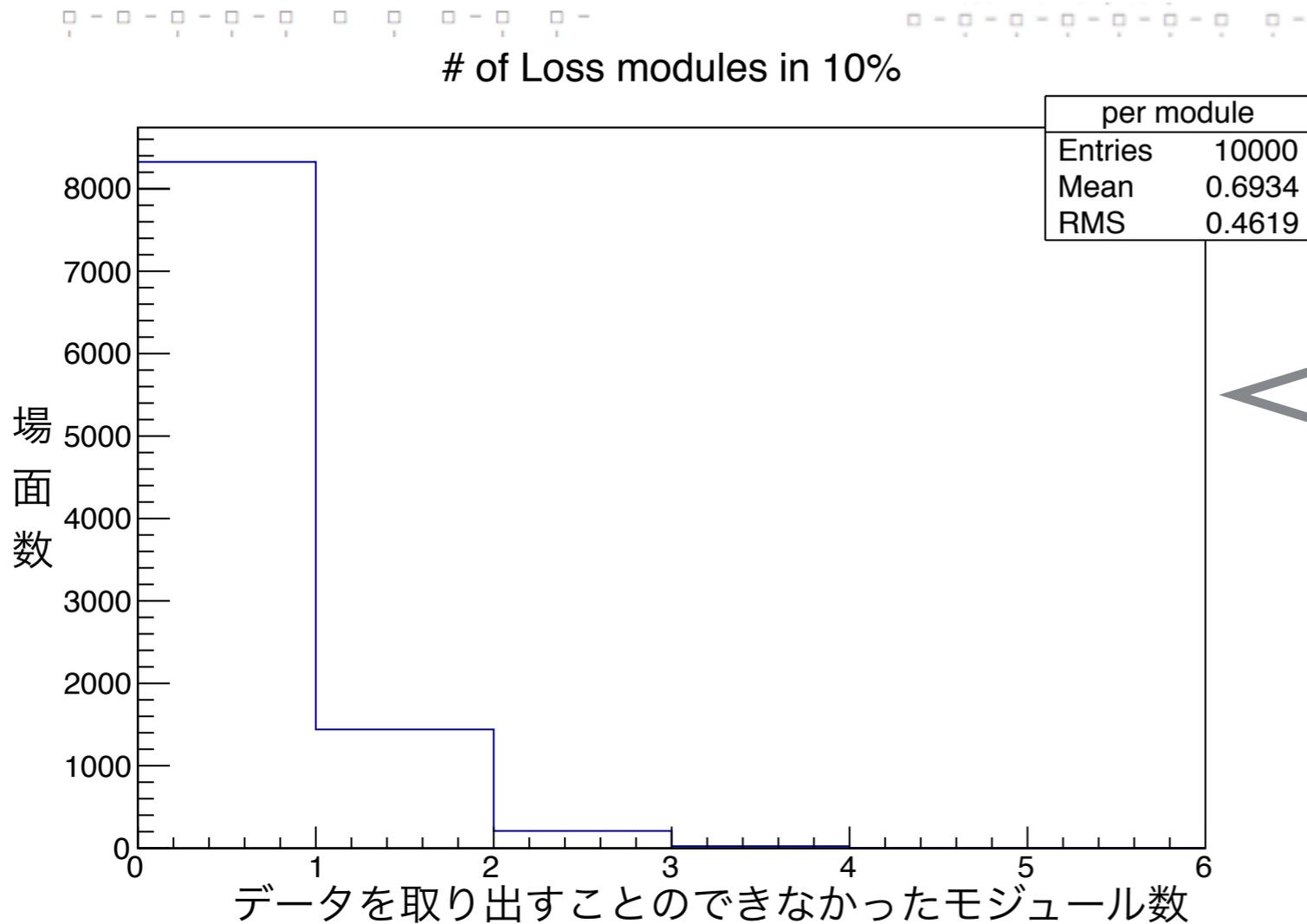
QBEE : 16/550



~ 1%

Q. SKのいままでの運用では、ケーブル断線はないのでは？
Q. 10% が一体どういう状況に対応している？

10×10 (30%断線)



10000場面作り出した結果
モジュール故障：0～3 / 1728 台
ケーブル：328～340 / 3392本
計340本断線状態

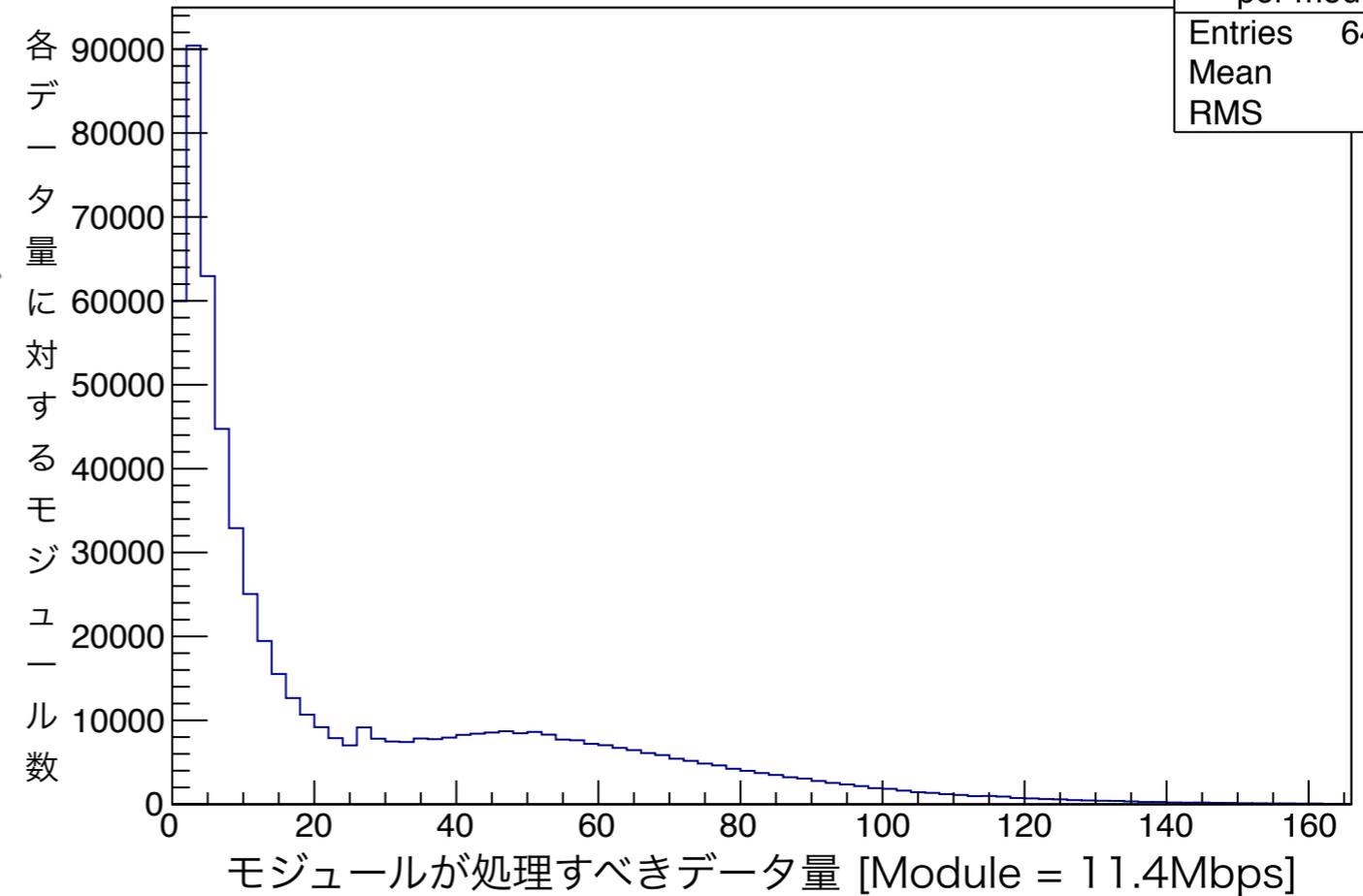
モジュール3台 = 72PMTs /
41472PMTs

Cut 10%

Amount of data in 10%

最も処理速度が要求される最上部
モジュールに集まるデータ量

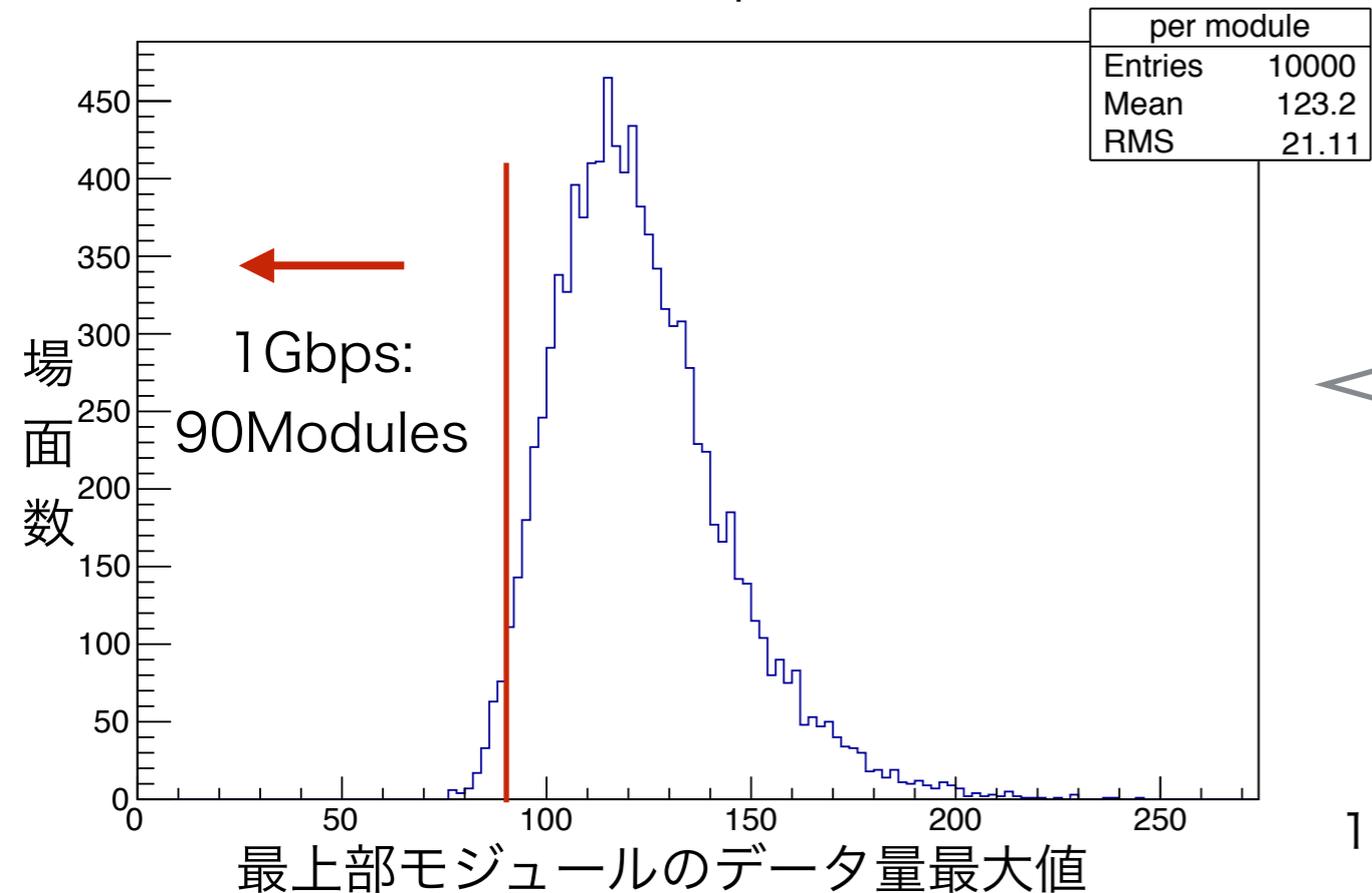
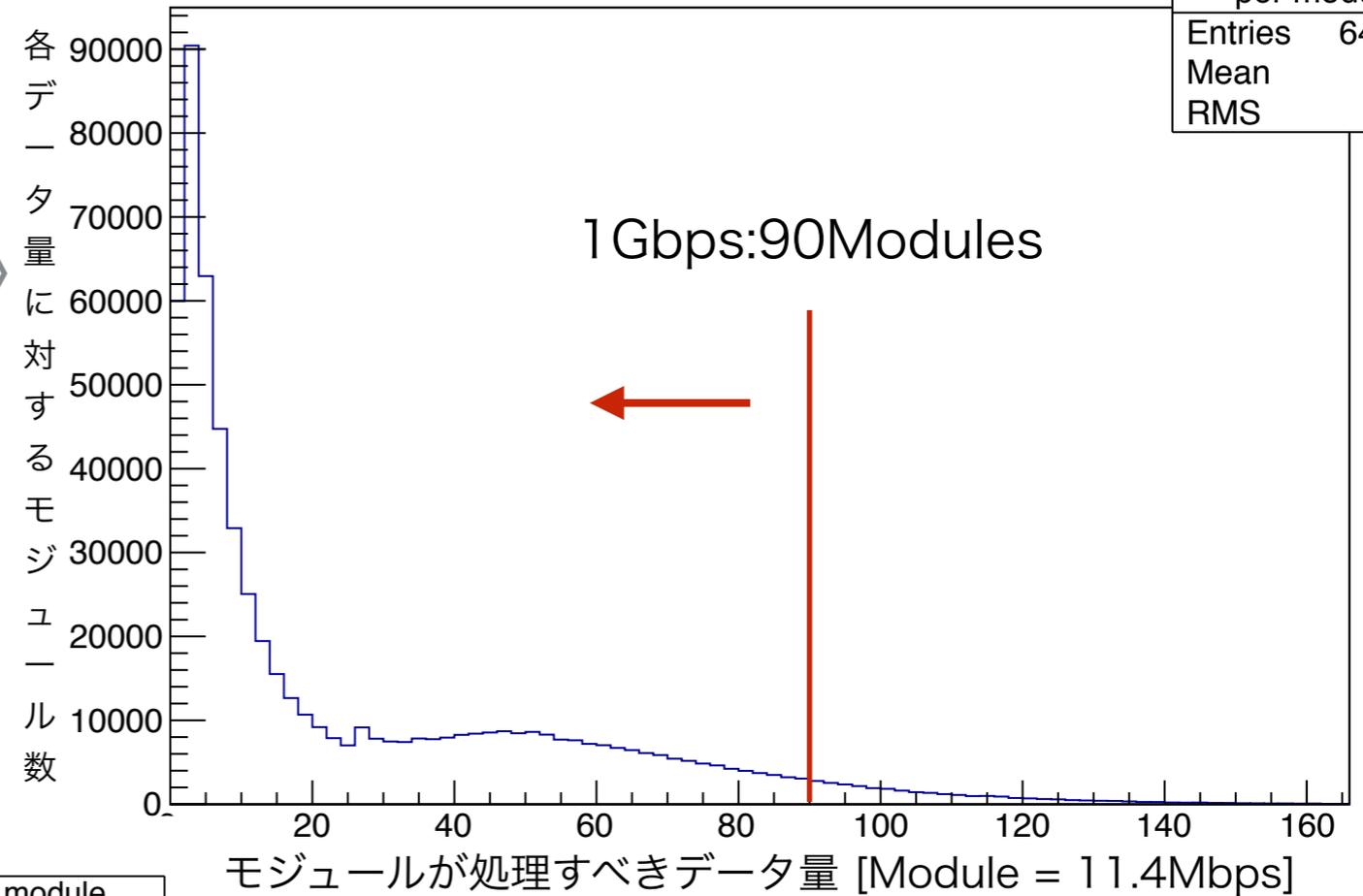
27modules付近が突出しているの
は、10%ではほとんどCutされな
いので直線上に集まることが多い
ため。



Cut 10% max data

Amount of data in 10%

1 Gbps Ethernetで
95%のモジュールのデータを
処理できる



しかし、ほとんどの場面で1 Gbps
で処理しきれないモジュールが存在。

⇒ 迂回するような新しいプロト
コルも必要

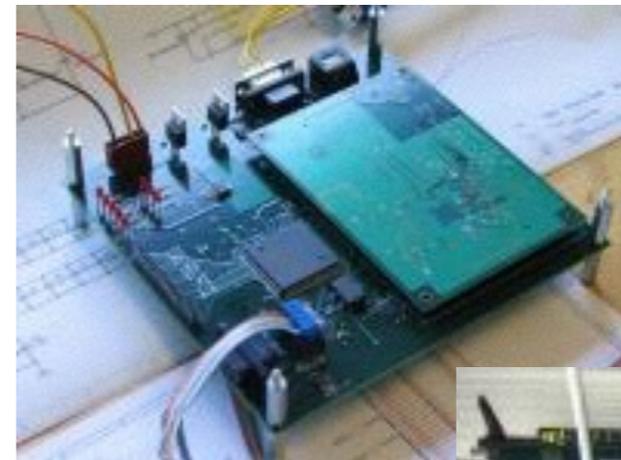
まとめと今後

- ・ 低負荷、故障耐性を持ったルーティングプランを考案した。
 - ・ 特定のモジュールに集中しすぎない工夫が必要。
 - ・ 一定の条件でループが生じてしまう。
 - ・ 現時点では、全体再起動やルーティングの手動設定のみ
- ・ Ethernetの規格は、価格や速度の要求、技術的な面からまだ選べない。
 - ・ 1Gbpsでも実現可能性は大いにある。

今後

PC内でソフトウェア的に
モジュール動作を実装、試験

4口ポートのボードでFPGAに実装、試験



QBEEネットワーク部
開発当時の写真



back up

Routing

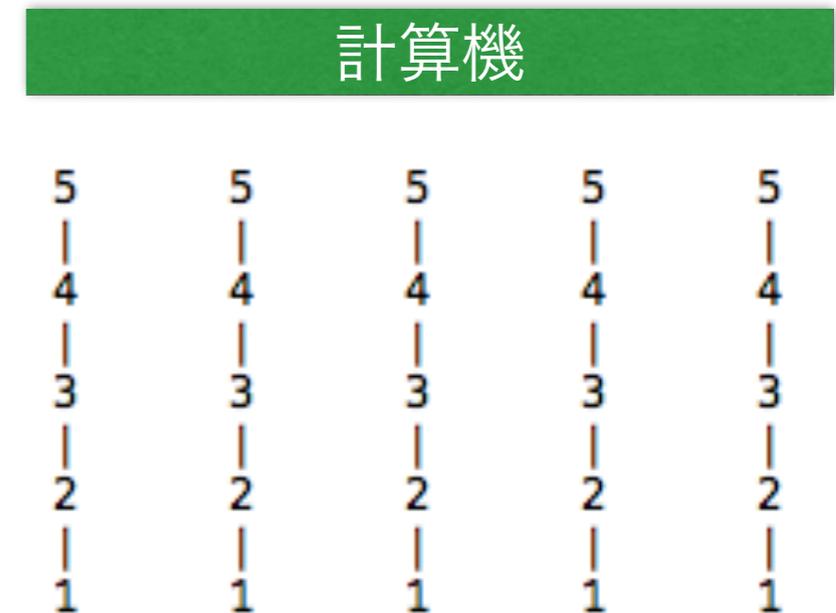
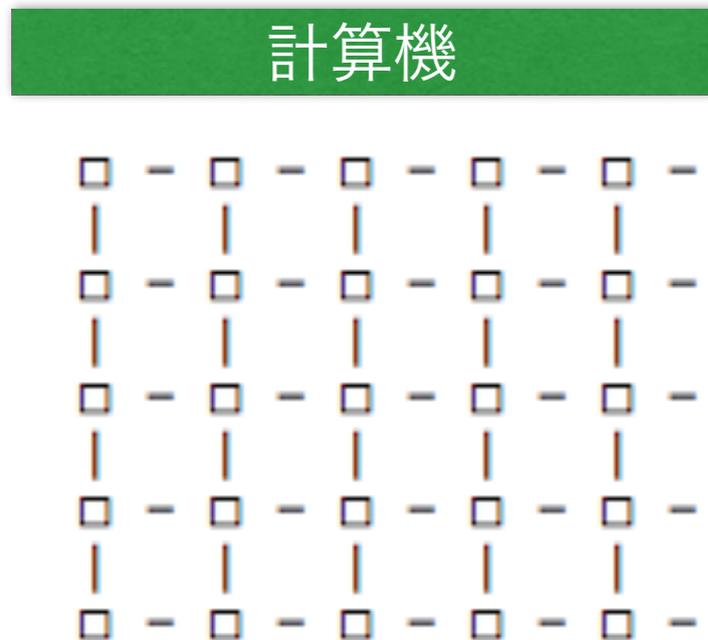
考えられる故障...

ケーブル：断線、被覆の劣化、ソケット劣化による故障

モジュール：ネットワーク部、ADC部の故障

1枚が故障したことによる大量のデータ損失を避ける

通常状態(5 × 5)



Routing

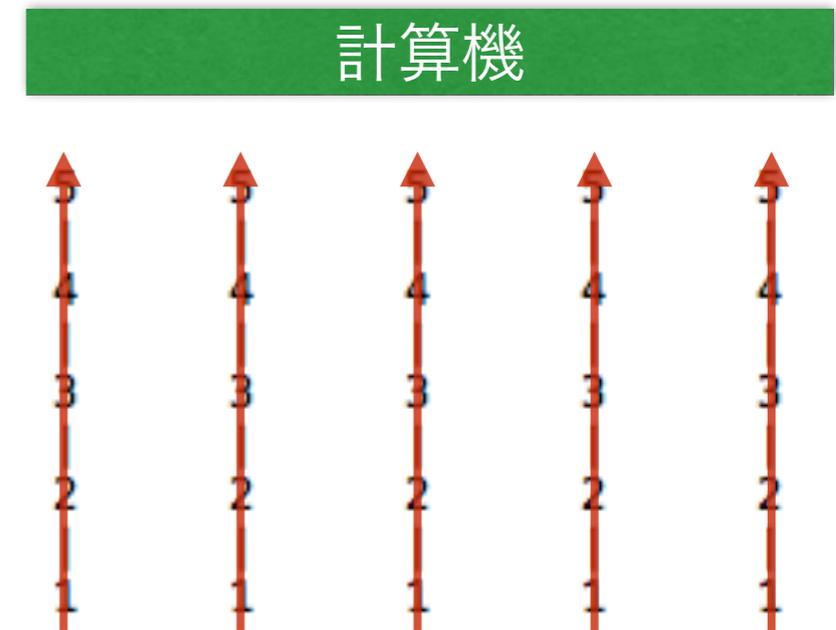
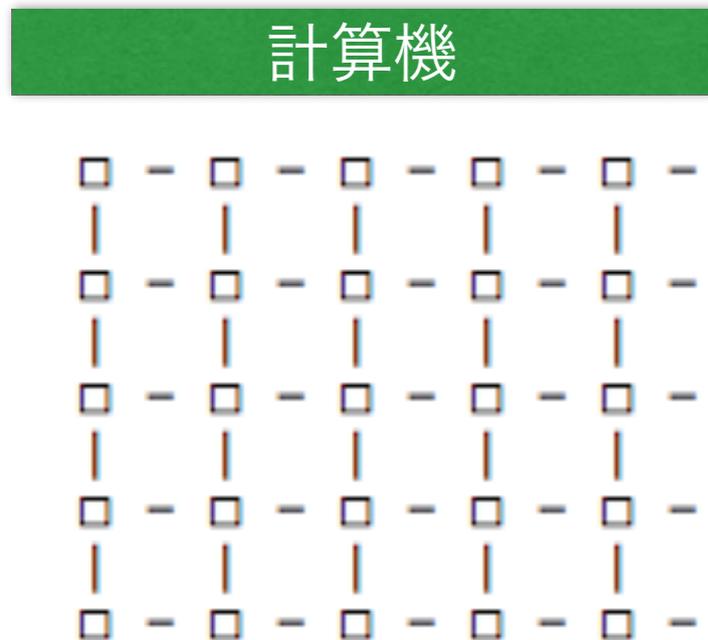
考えられる故障...

ケーブル：断線、被覆の劣化、ソケット劣化による故障

モジュール：ネットワーク部、ADC部の故障

1枚が故障したことによる大量のデータ損失を避ける

通常状態(5 × 5)



Routing

モジュール故障状態 (5 × 5)

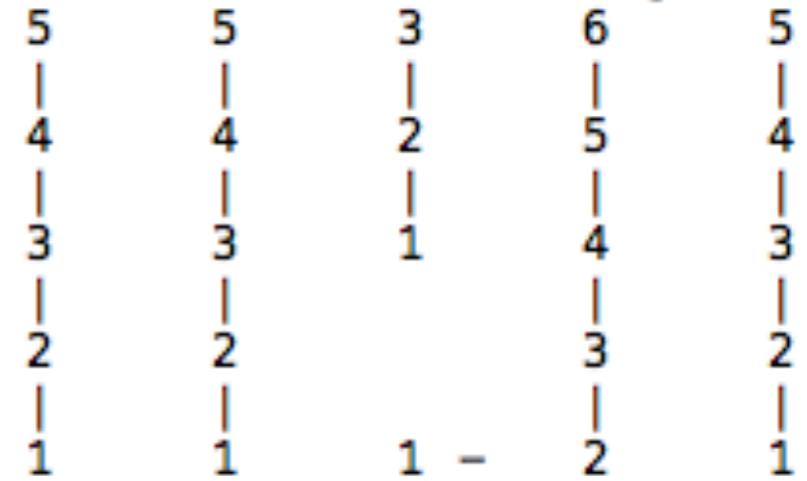
計算機



(1モジュール故障)

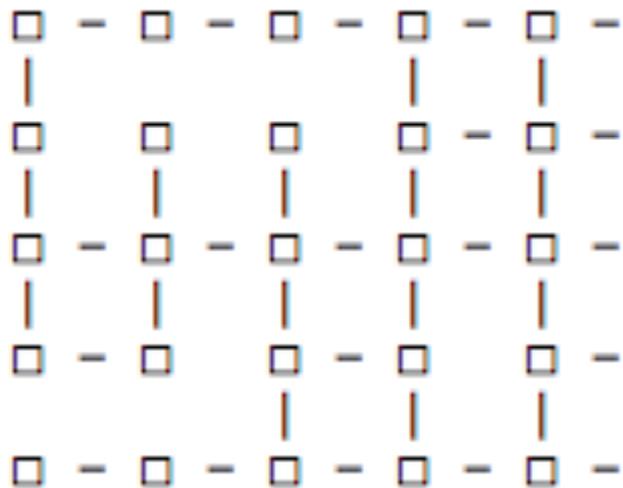


計算機



ケーブル断線状態 (5 × 5)

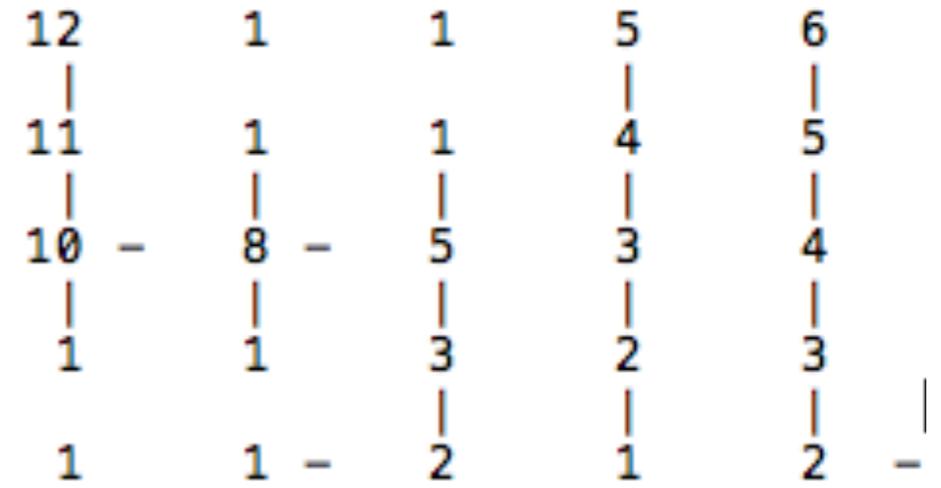
計算機



(縦横4本ずつ断線)



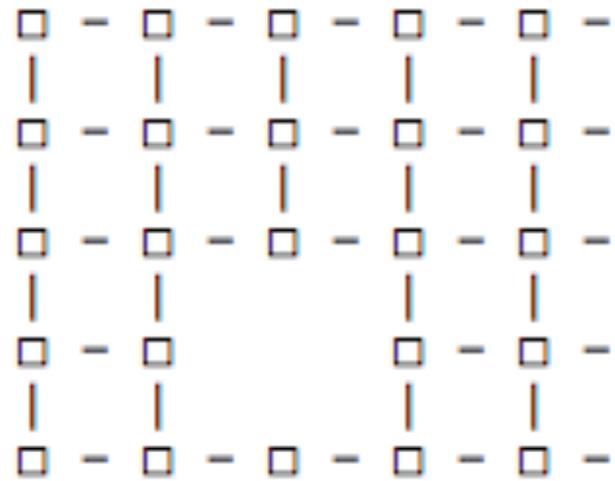
計算機



Routing

モジュール故障状態 (5 × 5)

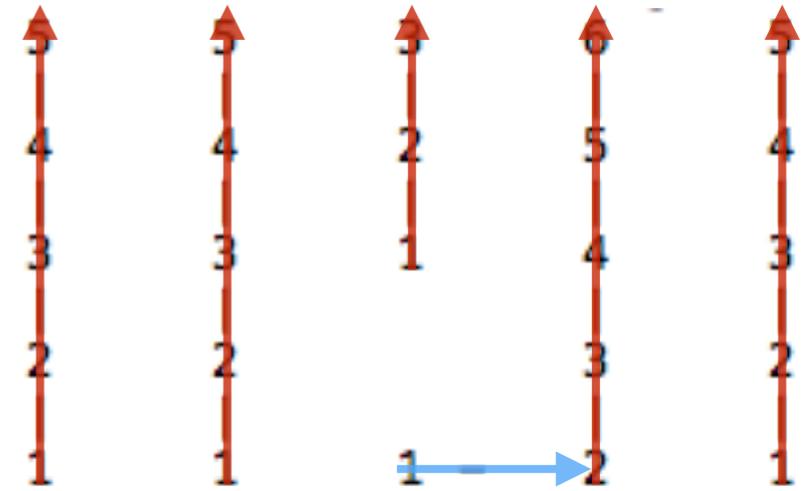
計算機



(1モジュール故障)



計算機



ケーブル断線状態 (5 × 5)

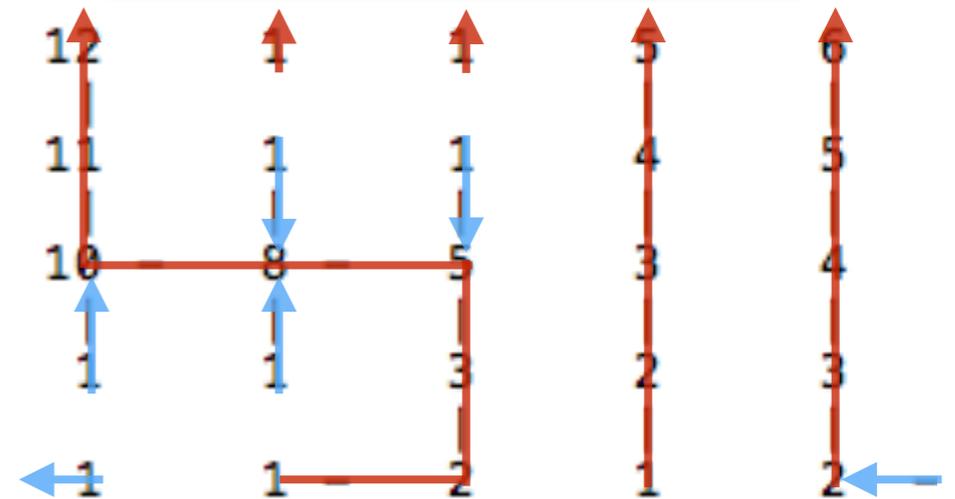
計算機



(縦横4本ずつ断線)



計算機



具体的なルーティングルール

1. 最上部のモジュールはPCに必ず流せるとする。
2. 上から行順に、以下のルールに従って経路を決定する。
 - ・ 周辺4方向のモジュールとケーブルの生死を確認し、さらに4方向のうちルートが決まっているモジュールがあるか確認。経路が決まっていればそのモジュールにデータを流す。
 - ・ 複数経路が決まっているモジュールがある場合には、「上>右>左>下」の優先度で経路決定を行う。
 - ・ 周辺に経路が決まっているモジュールがない場合には生死とルートが決まっているかの確認を絶えず行う。
 - ・ 永遠に決まらないものは、周囲のケーブルがすべて断線しているとみなす。
 - ・ TTLがある一定回数を超えた場合はループしているとみなし、電源を1回落とし再ルーティング。

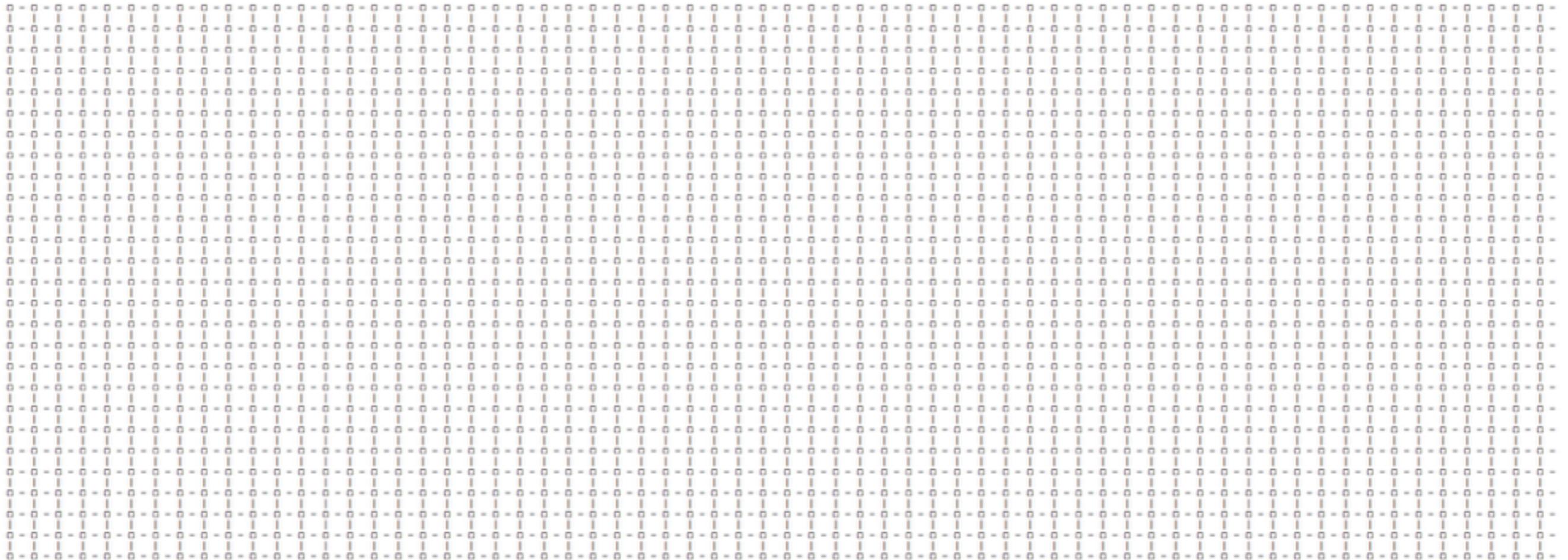
Simulation

【実際のスケール】

- ・ 縦27行 × 横64列

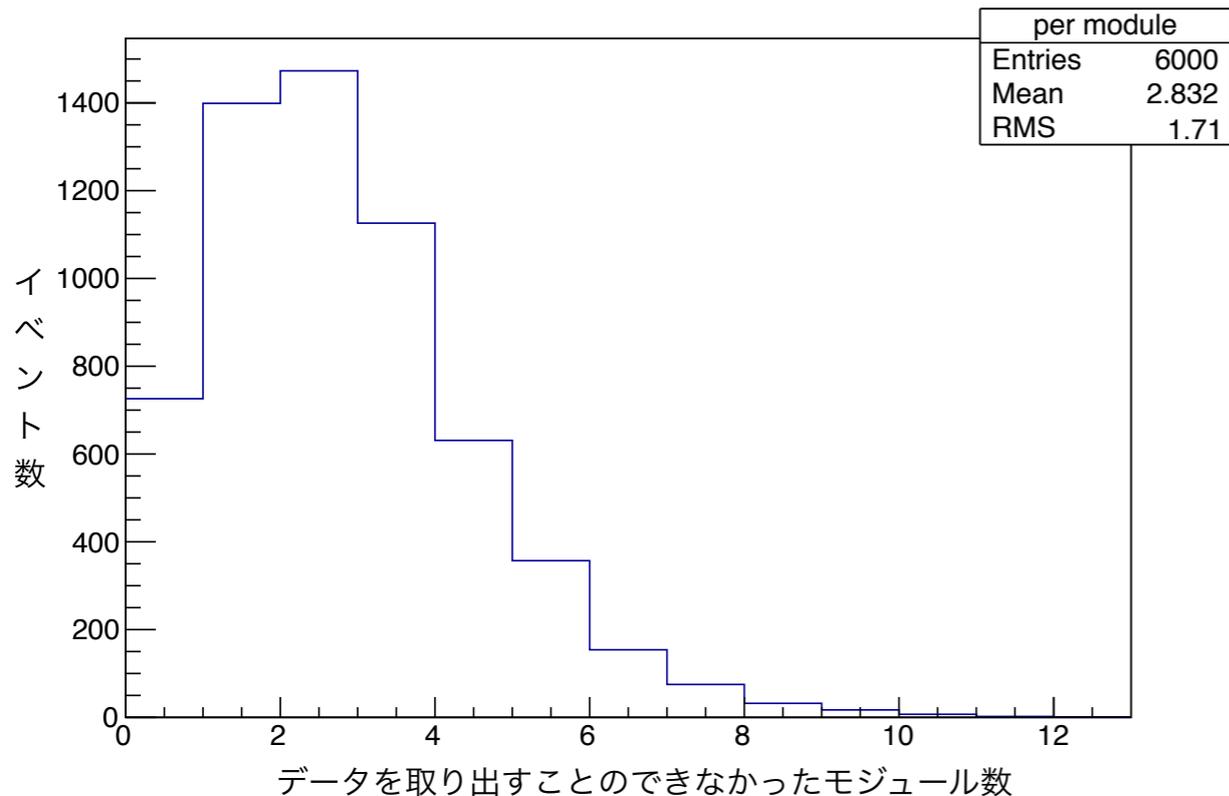
⇒ IDのほぼ実際のスケールに相当

(モジュール数1728個 : PMT数41472本)



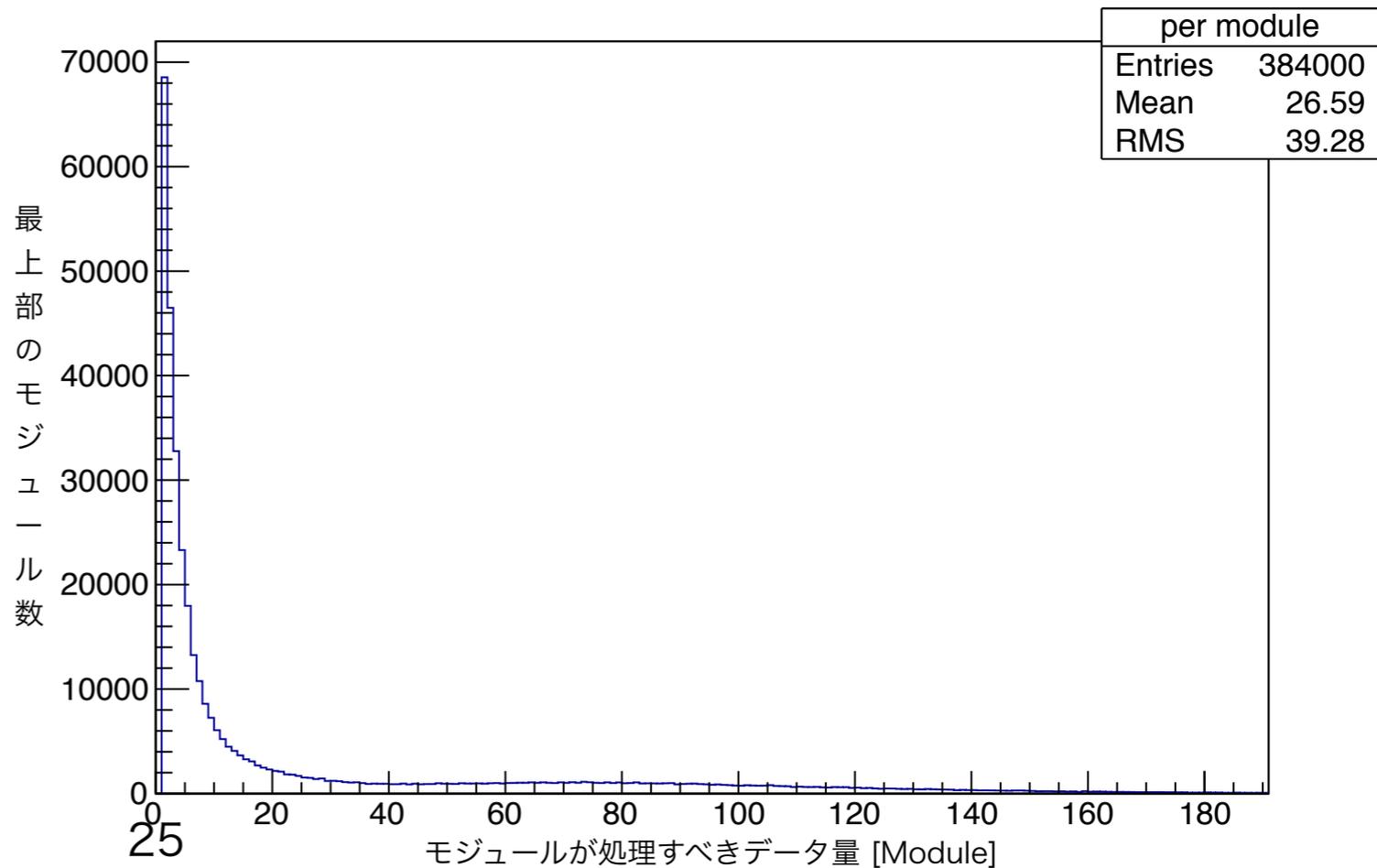
Cut 20%

of Loss modules in 20%



データが取り出せないモジュールは
最大で11モジュール程度。
(≒ 264PMTs / 41472 PMTs)

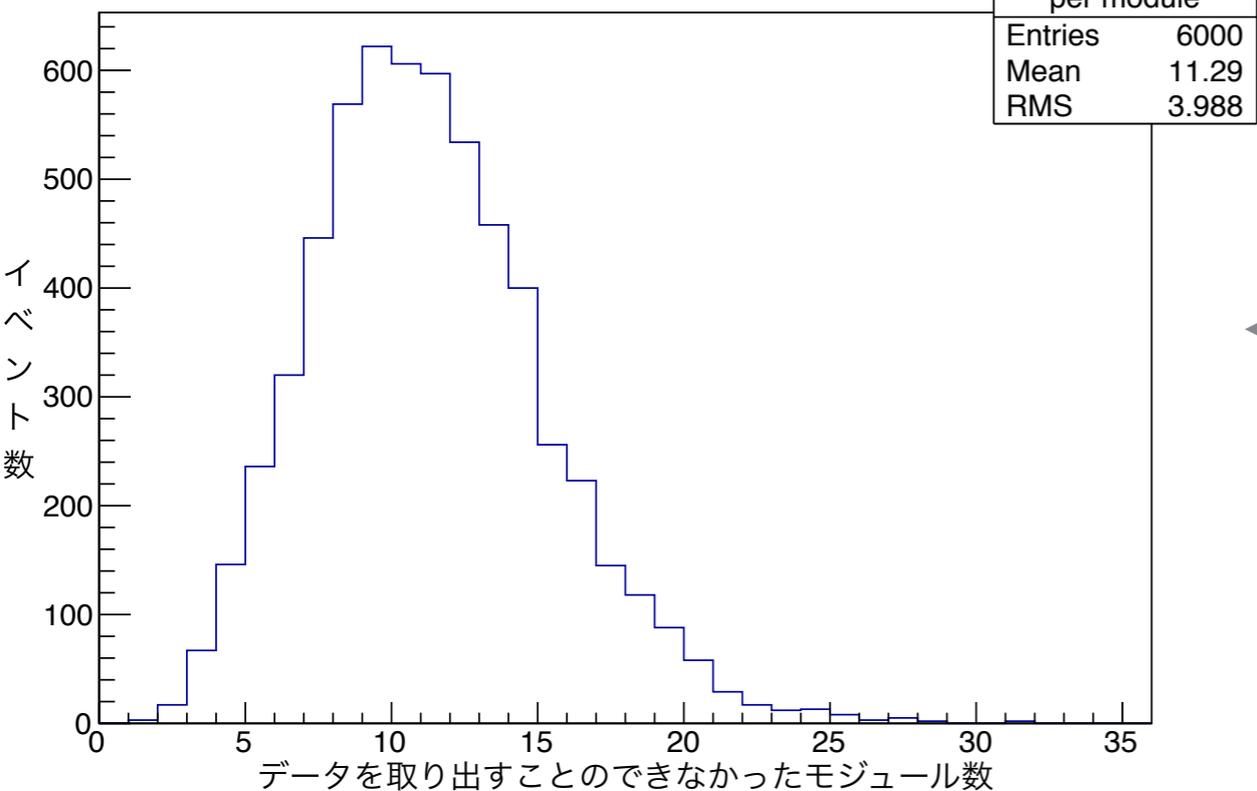
Amount of data in 20%



最大で180modules
(2016Mbps)分の
処理能力を要求

Cut 30%

of Loss modules in 10%

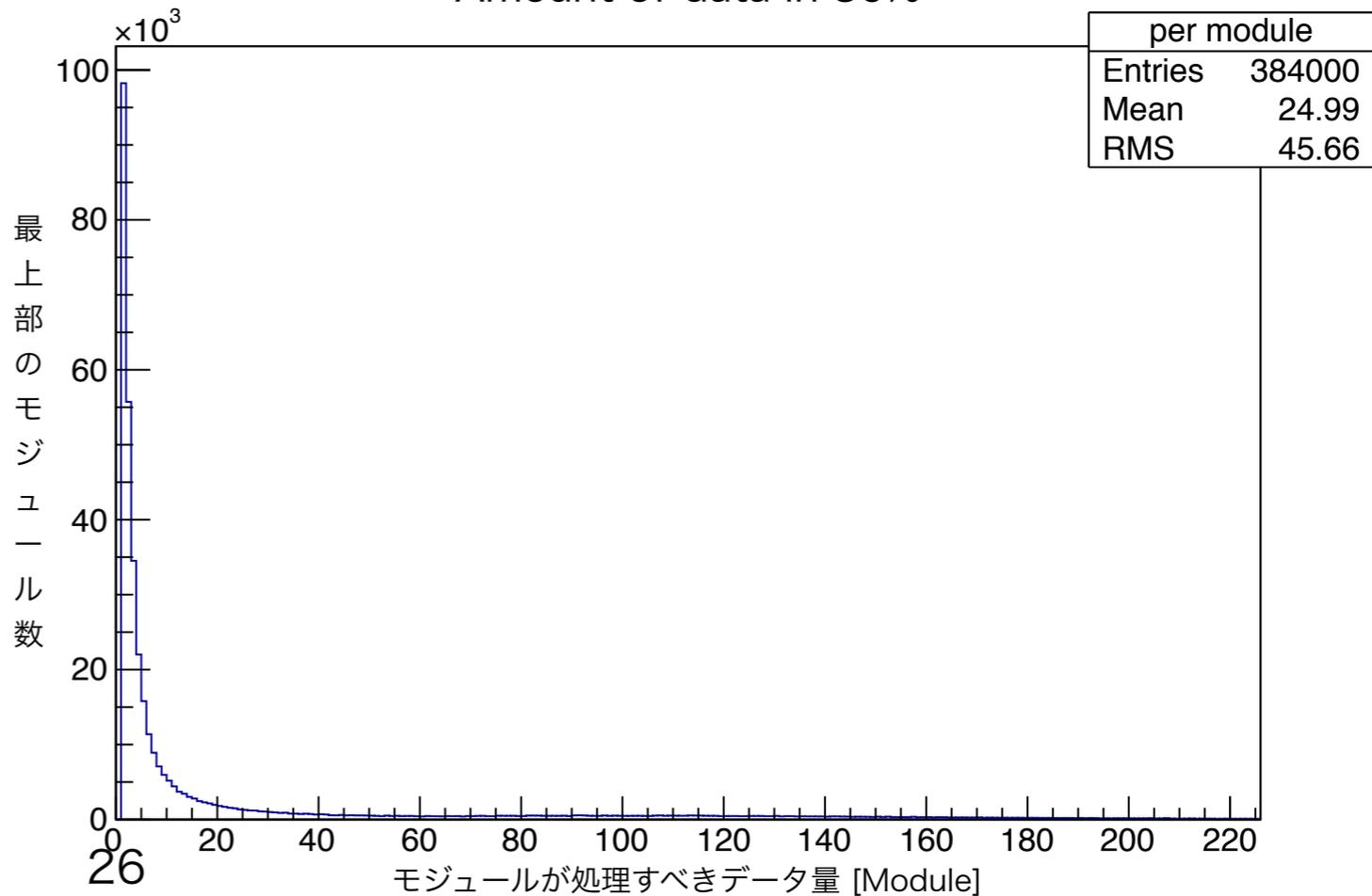


完全に送信できないモジュールは
最大で31モジュール。
($\approx 744\text{PMTs} / 41472\text{PMTs}$)

SK bad tube ratio : $\sim 1\%$

最大で220modules
(2464Mbps)分の
処理能力を要求

Amount of data in 30%



Simulation

【実際のスケール】

- ・ 縦27行 × 横64列

⇒ IDのほぼ実際のスケールに相当

(モジュール数1728個 : PMT数41472本)

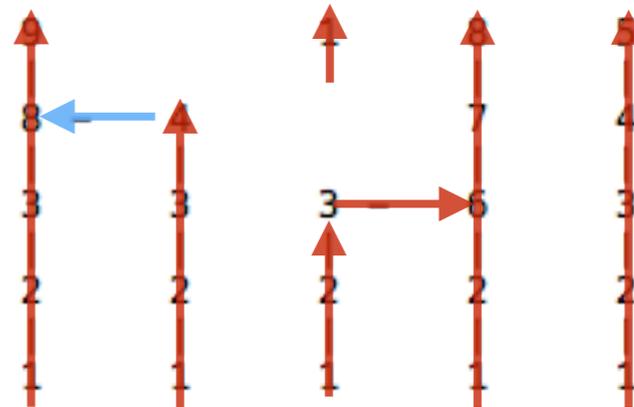
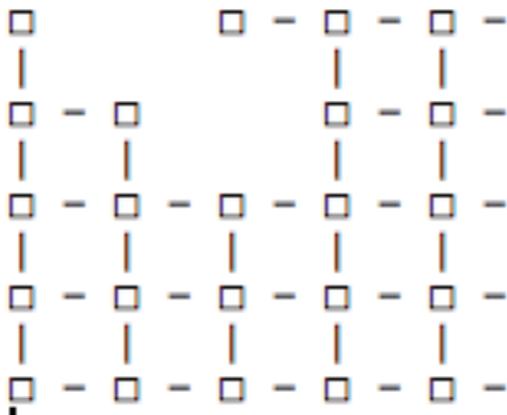
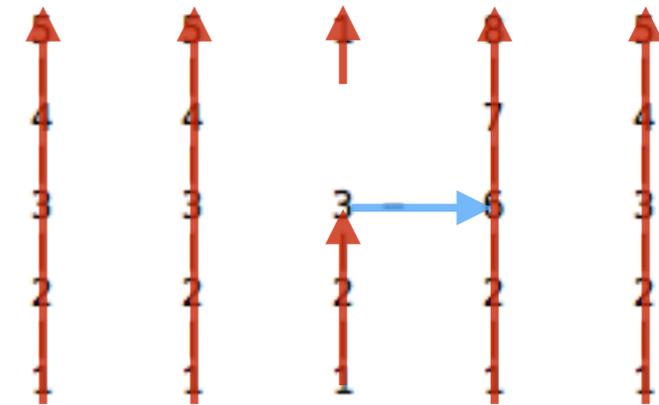
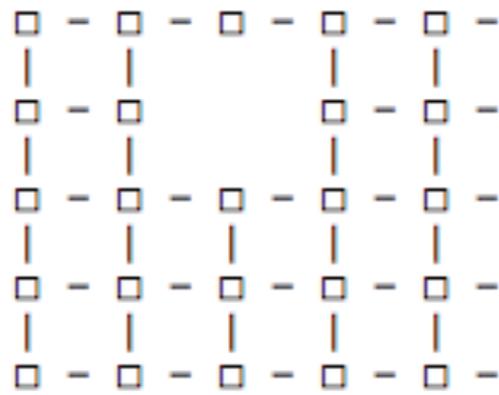
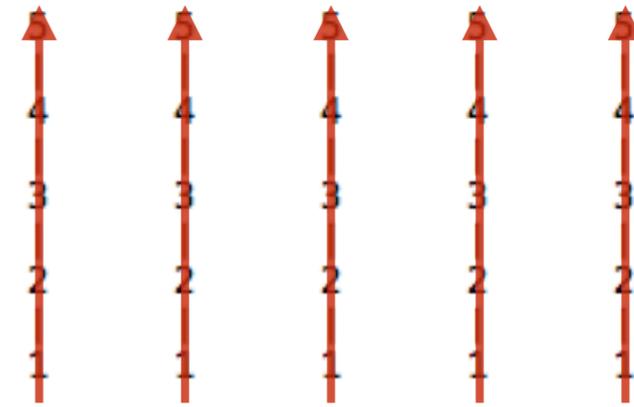
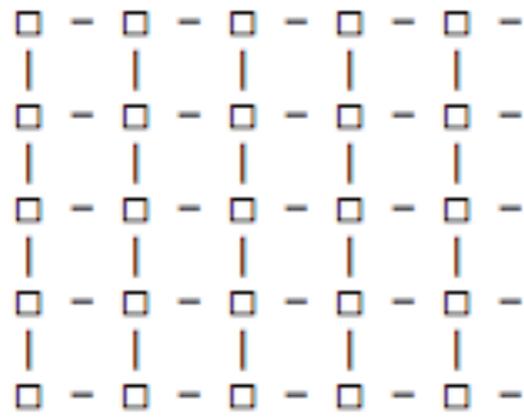
【シミュレーション条件】

- ・ モジュールやケーブルを次々に故障させる

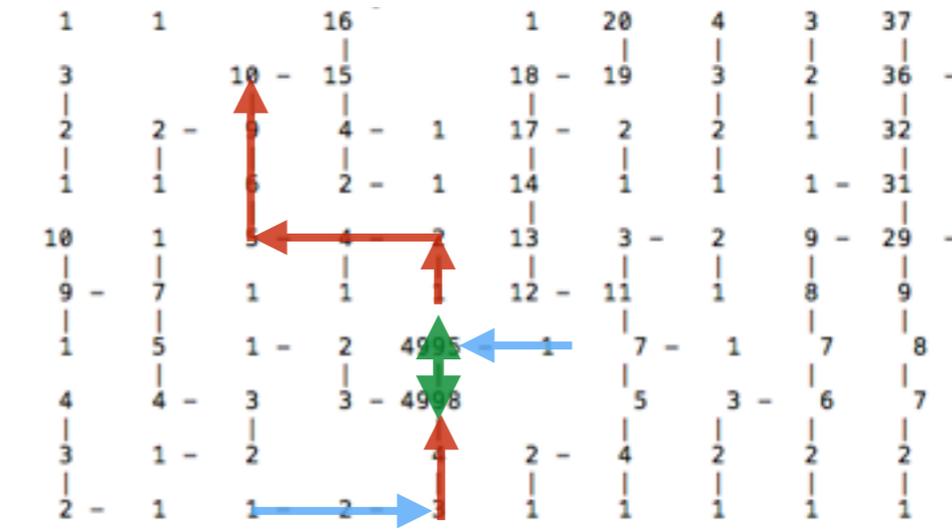
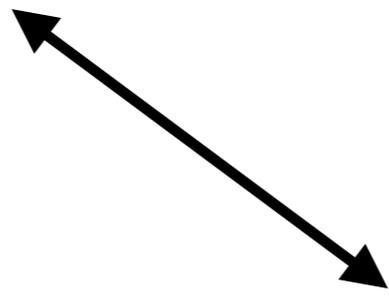
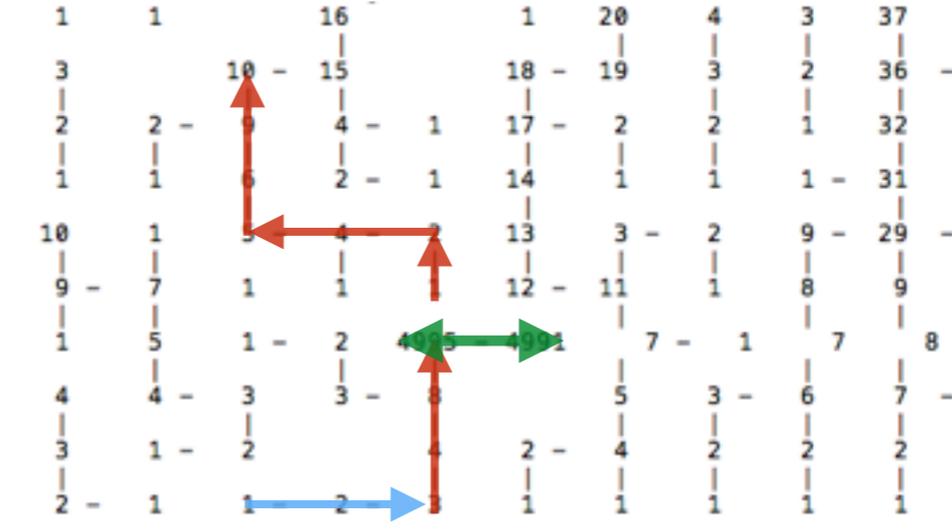
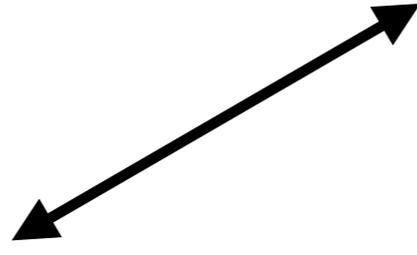
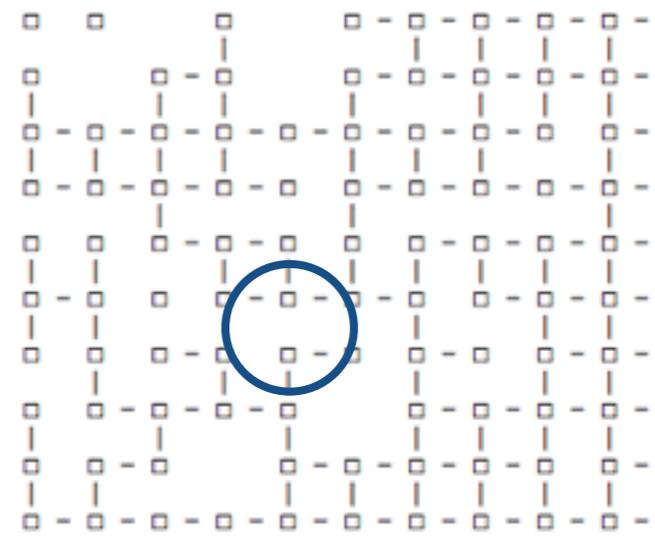
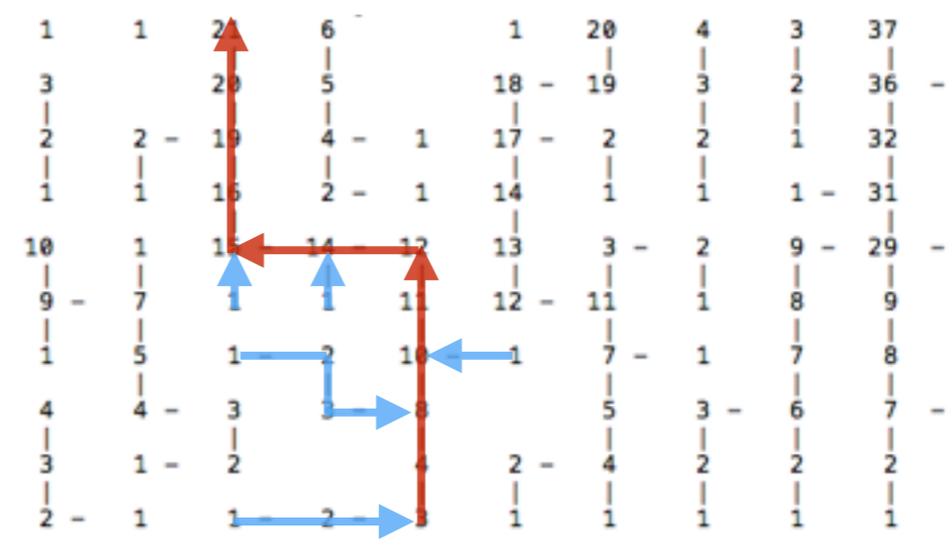
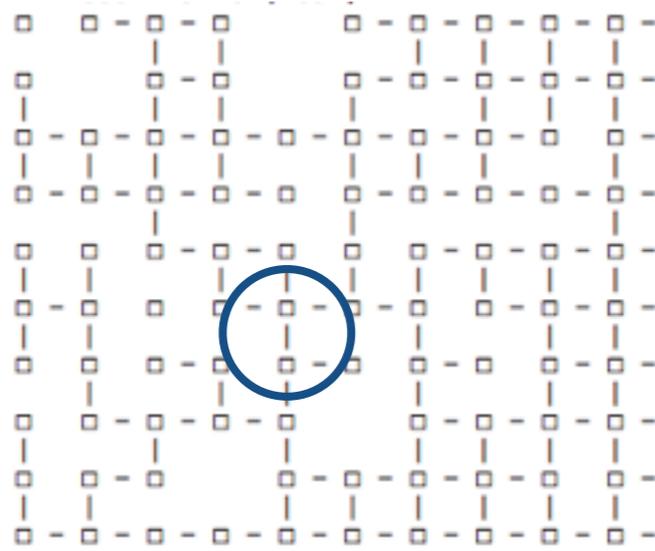
⇒ 自動的にルーティングされるか確認

Dynamic Routing

Example (5x5)



Dynamic Routing Failure



2個以上離れた切断の情報を共有していないための失敗

1 module Data

- PMT 1hit あたり 6Bytes
- 1 Module あたり 24ch PMT

4.2kHz dark rate

The dark rate of several HQE B&L PMTs were measured to be 10 kHz at room temperature after stabilization for a few days. With the 13 °C temperature expected in Hyper-K and a long time stabilization, we expect the dark rate to be 8-9 kHz in Hyper-K. It is high compared to the Super-K PMT (4.2 kHz), but the dark hit rate per photon detection efficiency is about the same because of the double detection efficiency. Section III discusses the adequacy of this dark hit rate on the physics sensitivities.

604.8KB/s

(SK PMT)

8kHz dark rate

Shape	Hemispherical
Photocathode area	50cm diameter (20 inches)
Bulb material	Borosilicate glass (~3mm)
Photocathode material	Bialkali (Sb-K-Cs)
Quantum efficiency	30% typical at $\lambda = 390\text{nm}$
Collection efficiency	95% at 10^7 gain
Dynodes	10 stage box-and-line type
Gain	10^7 at ~2000 V
Dark pulse rate	~8kHz at 10^7 gain (13 Celsius degrees, after stabilization for a long period)
Transit time spread	2.7 nsec (FWHM) for single photoelectron signals
Weight	7.5 kg (without cable)
Volume	61,050 cm ³
Pressure tolerance	9kg/cm ² water proof

TABLE XV. Specifications of the 50cm R12860-HQE PMT by Hamamatsu.

1.2MB/s

(HyperK B&L PMT)

10kHz dark rate

1.4MB/s

Reference Value

Ethernet Speed

- # of Inner PMT : about 40,000

- top , bottom : 7660

- side : 24800

- # of Module :

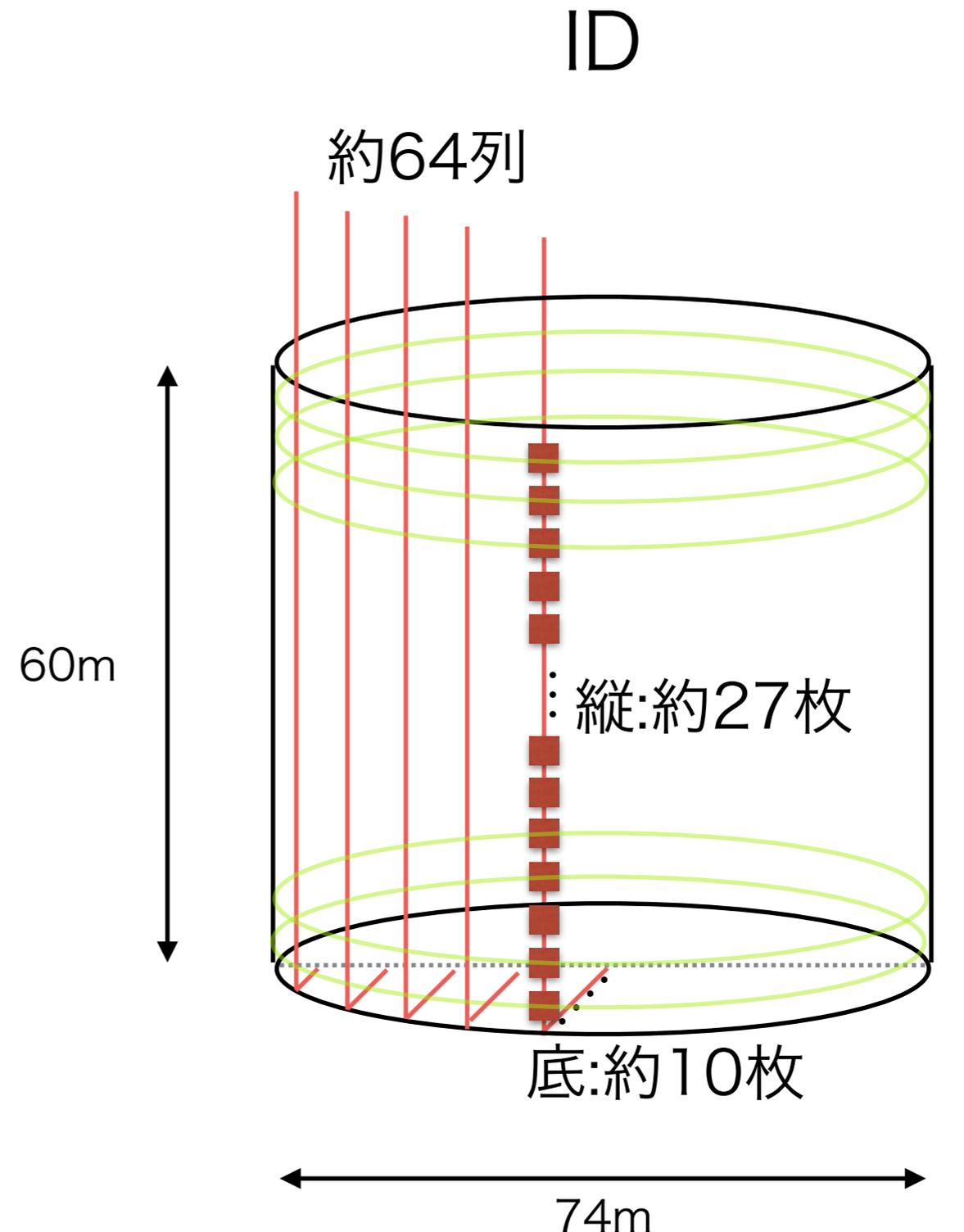
- top, bottom : 320

- side : 1035

- Maximum : 27 modules in a row

- $1.4\text{MB/s} \times 27 = 37.8\text{MB/s} = 302.4\text{Mbps}$

- required : **907.2Mbps < 10Gbps? 1Gbps?**



タンクの外壁から2mを水槽と仮定

Ethernet Speed

- # of Outer PMT : about 6,700
 - top , bottom : 1285
 - side : 4130
- # of Module :
 - top, bottom : 54
 - side : 170
- Maximum : 11 modules in a row
 - $1.4\text{MB/s} \times 11 = 15.4\text{MB/s} = 123.2\text{Mbps}$
 - required : **369.6Mbps < 1 Gbps**

