

- 事故原因のまとめ(前回委員会より)
- 再発防止対策のまとめ(前回委員会より)
- 衝撃波防止ケース
  - 実証実験
  - 強度計算
  - 40m実証実験
  - ケース入り増倍管の耐衝撃波特性
- 平成14年度部分再建計画について
- 全面復旧について
  - 全面復旧の必要性
  - 全面復旧計画(案)

# 事故原因のまとめ

- 今回の事故は、まず底面にあった増倍管(改修時交換球10850または非交換球10810)が爆縮し衝撃波が発生、その衝撃波が隣接する増倍管を破壊しさらに衝撃波が発生する、という一連の連鎖反応によって起きたと考えられる。
- 最初の爆縮球は、改修時の底面作業の際受けたストレスによりネック部の強度が弱まり、3気圧の水圧により破断したか、あるいはスーパーカミオカンデ改修時にASSY部等に損傷を受けた増倍管が3気圧の水圧で破断した可能性がある。
- シミュレーションによると、衝撃波は約50cm離れた隣の増倍管のガラス部位置で、だいたい、0.05ミリ秒、130気圧のパルスとなって到着する。ただしこれらの値はシミュレーションの詳細に依存する。
- スーパーカミオカンデ底部において事故当時と同じ条件で衝撃波発生・伝播の再現実験を行ったところ、増倍管爆縮による衝撃波が隣接増倍管を破壊することが確かめられた。

# 再発防止対策のまとめ

- 増倍管取り付け時にストレスを与えないよう作業手順を改良するとともに作業監督要員を置く。
  - 特に底面作業において、増倍管の取り扱いは下部より行う。
  
- 万が一増倍管が爆縮を起こしても連鎖が起きないように、増倍管を衝撃波防止ケース内に格納する、または、衝撃波に耐えられる強度を持った新しい増倍管を開発して使用する。
  - 1月終わりまでに衝撃波防止ケースの開発とその実証実験を行った。

# 衝撃波防止ケース実証実験

名称	厚み	実験日	水深	備考
Acr-	アクリル 6 mm	1月22日	27.3 m	開口率0.3%
Acr-	アクリル 6 mm	1月24日	27.1 m	開口率 1 %
FRP-	FRP 3 mm + アクリル 6 mm	1月23日	27.2 m	
FRP-	FRP 7 mm + アクリル 1 5 mm	1月25日	27.0 m	
FRP-	FRP 5 mm + アクリル 1 5 mm	1月26日	26.9 m	
FRP-	FRP 5 mm + アクリル 1 0 mm	1月26日	26.9 m	
FRP-	FRP 3 mm + アクリル 1 5 mm	1月27日	26.8 m	
FRP-	FRP 5 mm + アクリル 1 5 mm	1月27日	26.7 m	逆防爆実験
SUS- I	ステンレス 1 mm + アクリル 1 0 mm	1月23日	27.1 m	
SUS- II	ステンレス 2 mm + アクリル 1 0 mm	1月25日	27.0 m	
SUS- III	ステンレス 6 mm (下部のみ)	1月26日	26.9 m	松本先生案

# 全アクリルケース (Acrylic Case)

- 10mm厚アクリル板を木型によって成形(2枚1組)。
- 増倍管を実装した後接着する。
- 製品のアクリル厚は成形作業によって6mm厚まで薄くなった部分がある。



# 全アクリルケースの応力 (5気圧)

RESULTS: 3- B.C. 1, STRESS\_3, LOAD SET 1  
E:\1\crr\exp\_case\_sol\01.mf1  
STRESS - VON MISES MIN: 3.94E+02 MAX: 2.75E+04  
FRAME OF REF: PART

単位: kPa

VALUE OPTION: ACTUAL  
SHELL SURFACE: BOTTOM  
2.75E+04

2.48E+04

2.21E+04

1.94E+04

1.67E+04

1.40E+04

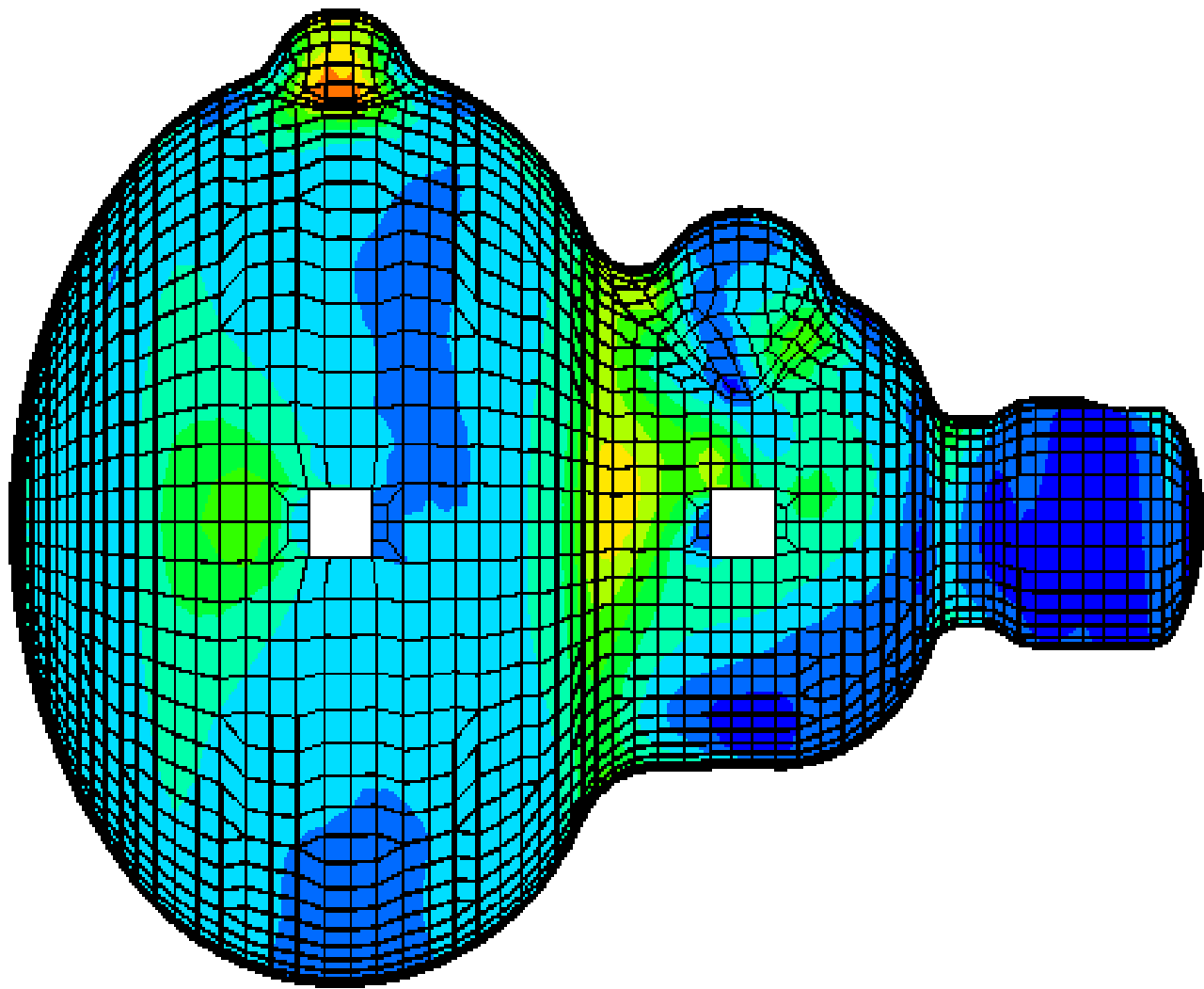
1.12E+04

8.53E+03

5.82E+03

3.11E+03

3.94E+02

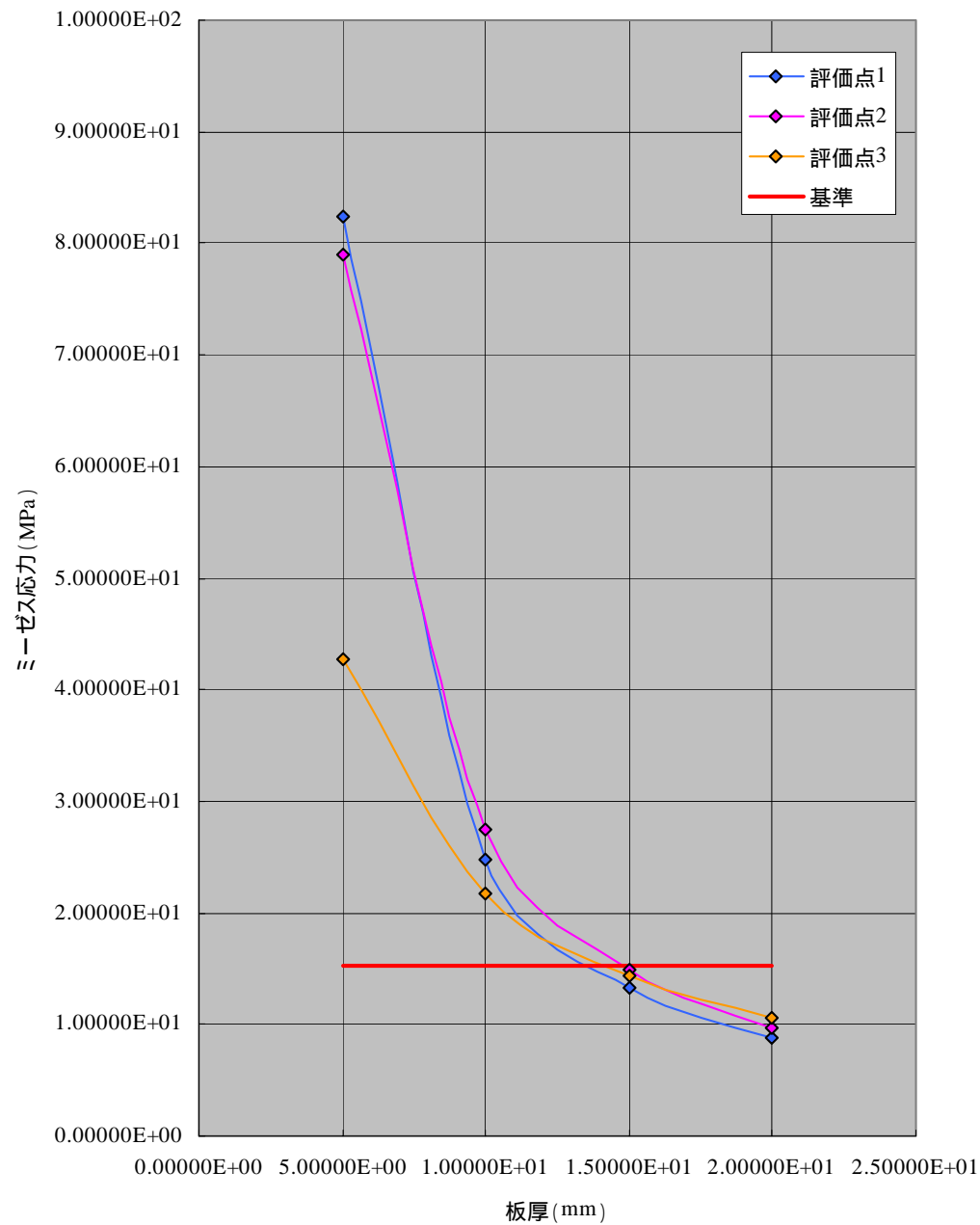


■モデル1ケース2 (t=10.0) ミーゼス応力コンタ図 (X-Y view); シェル底面

# ミーゼス応力

アクリル引っ張り強度: 76 Mpa

グラフ3. シェル底面 (bottom)/モデル内面



## 強度の評価

- **アクリル引っ張り強度以上の応力集中を避けるためには最低7mm厚のアクリルが必要**
  - 最小厚6mmのサンプルが4気圧(30m水深)で破壊
  - 静水圧試験でも4気圧で最大口径こぶ部分が陥没
- **衝撃波防止ケースとして、10 - 15mmの厚みが必要**
  - 10mm厚での最大応力は引っ張り強度の2.5分の1程度
  - 15mm厚では最大応力は引っ張り強度の5分の1以下
- **改良点としては、形状をなるべく対称形にすること**

Acr - 破壞

020121 1837 001 0521266



Acr - 、 破壞

020124 1124 001 0044942

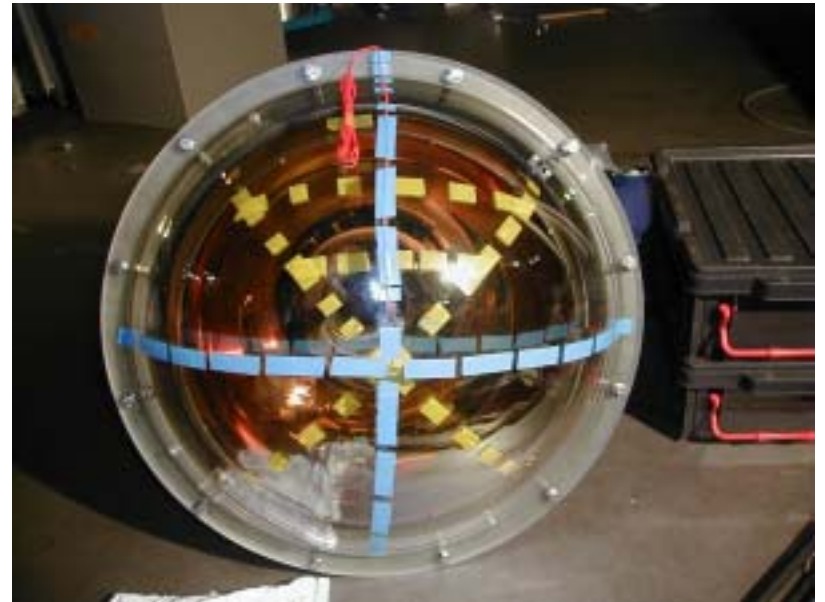


# アクリル+FRP

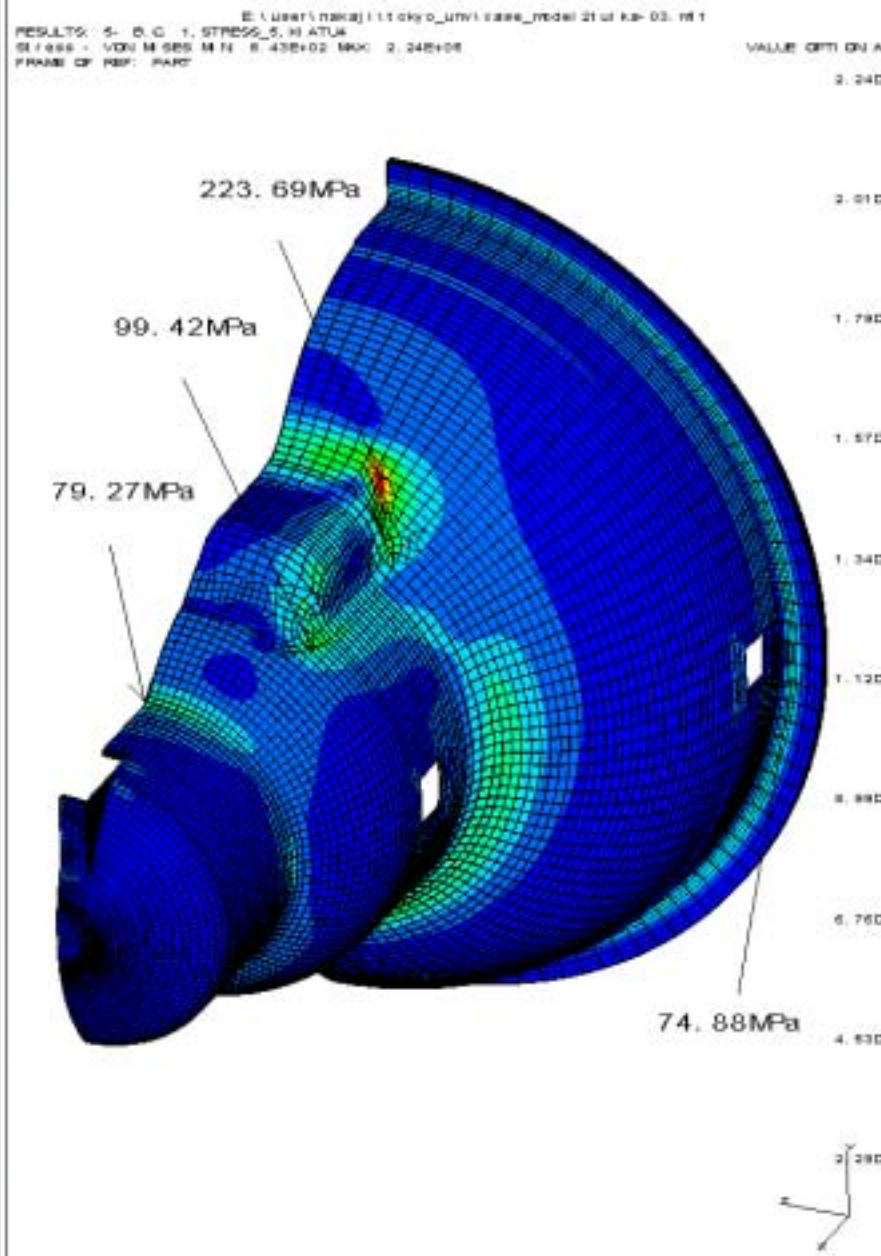
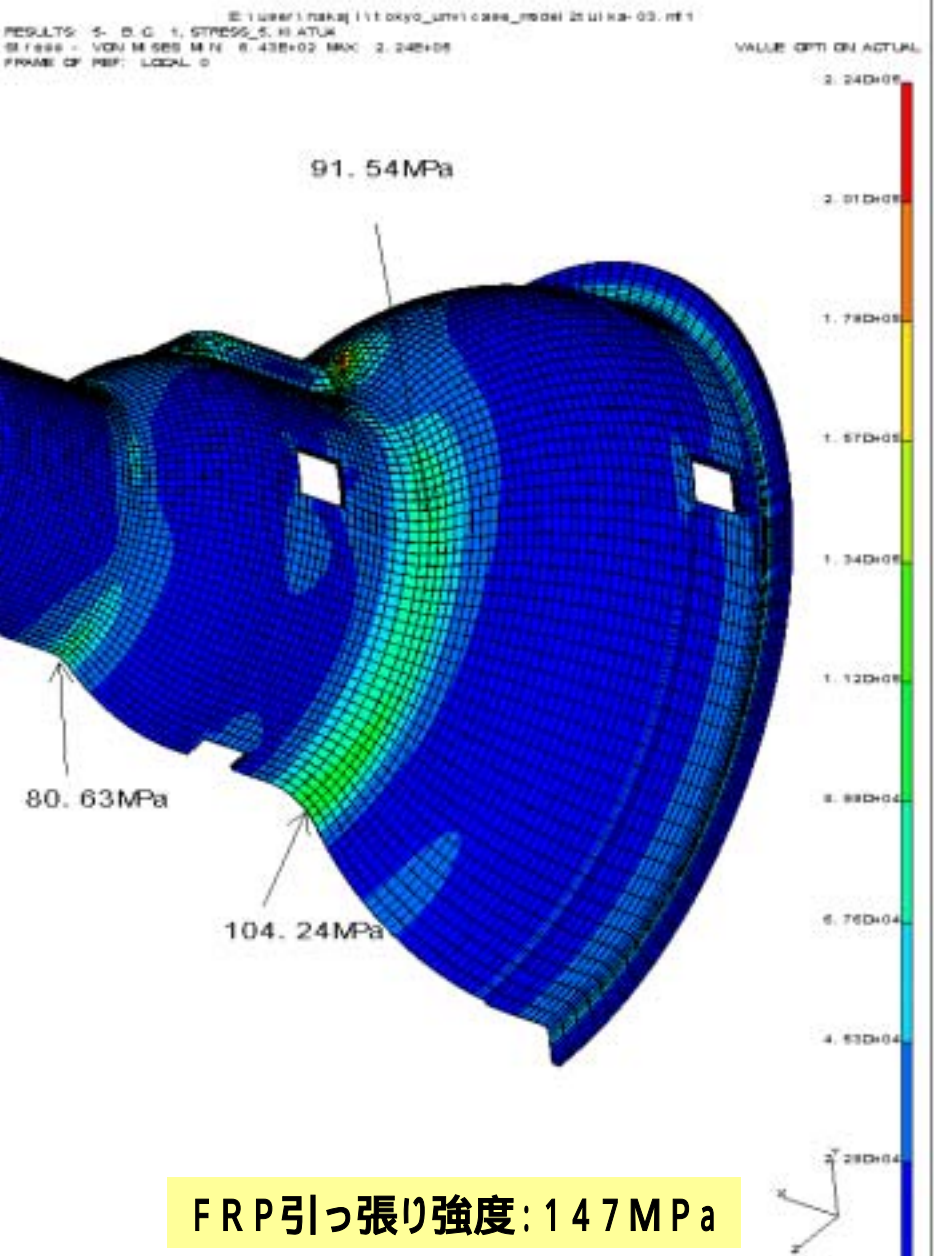
FRP部



アクリル部

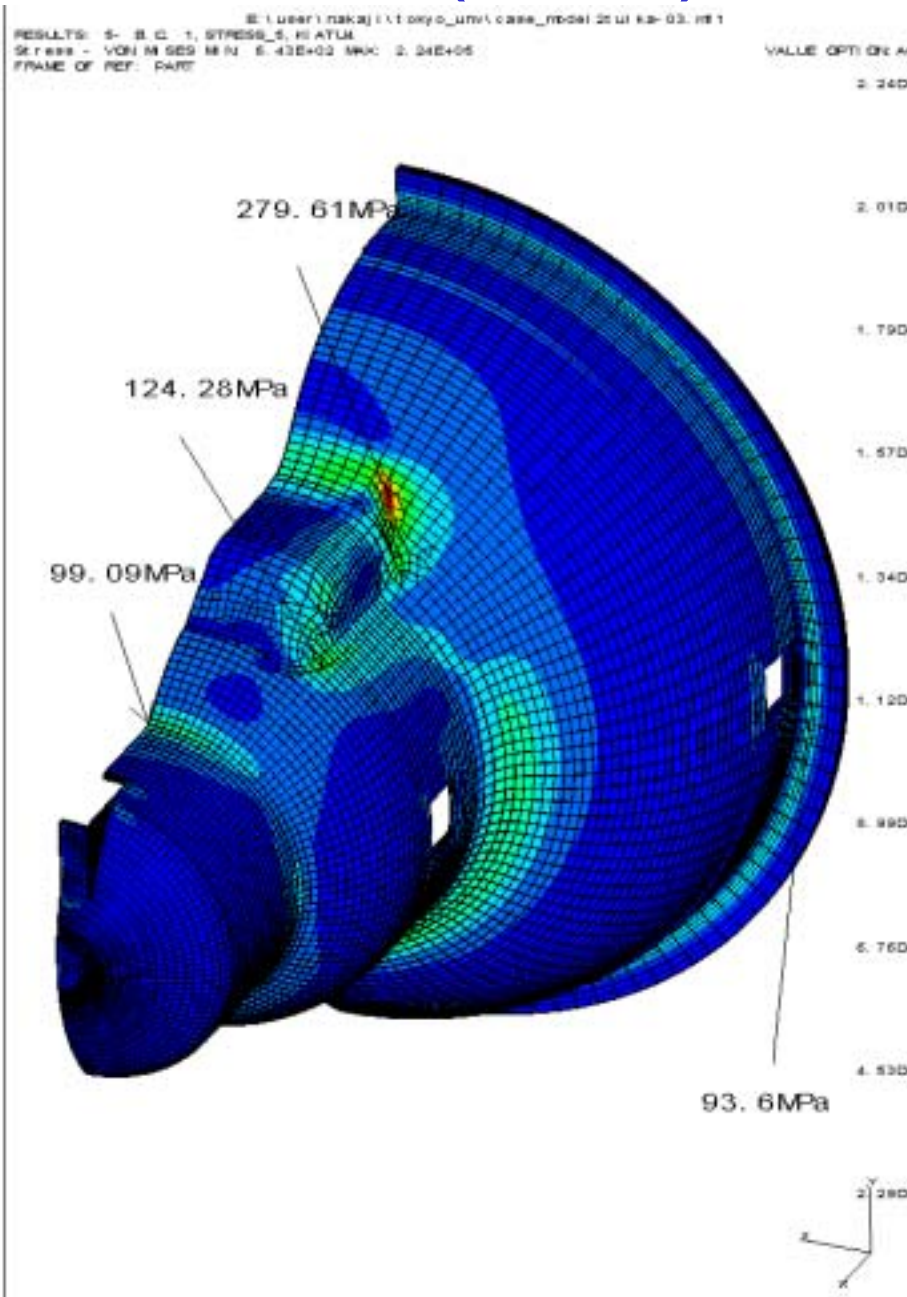
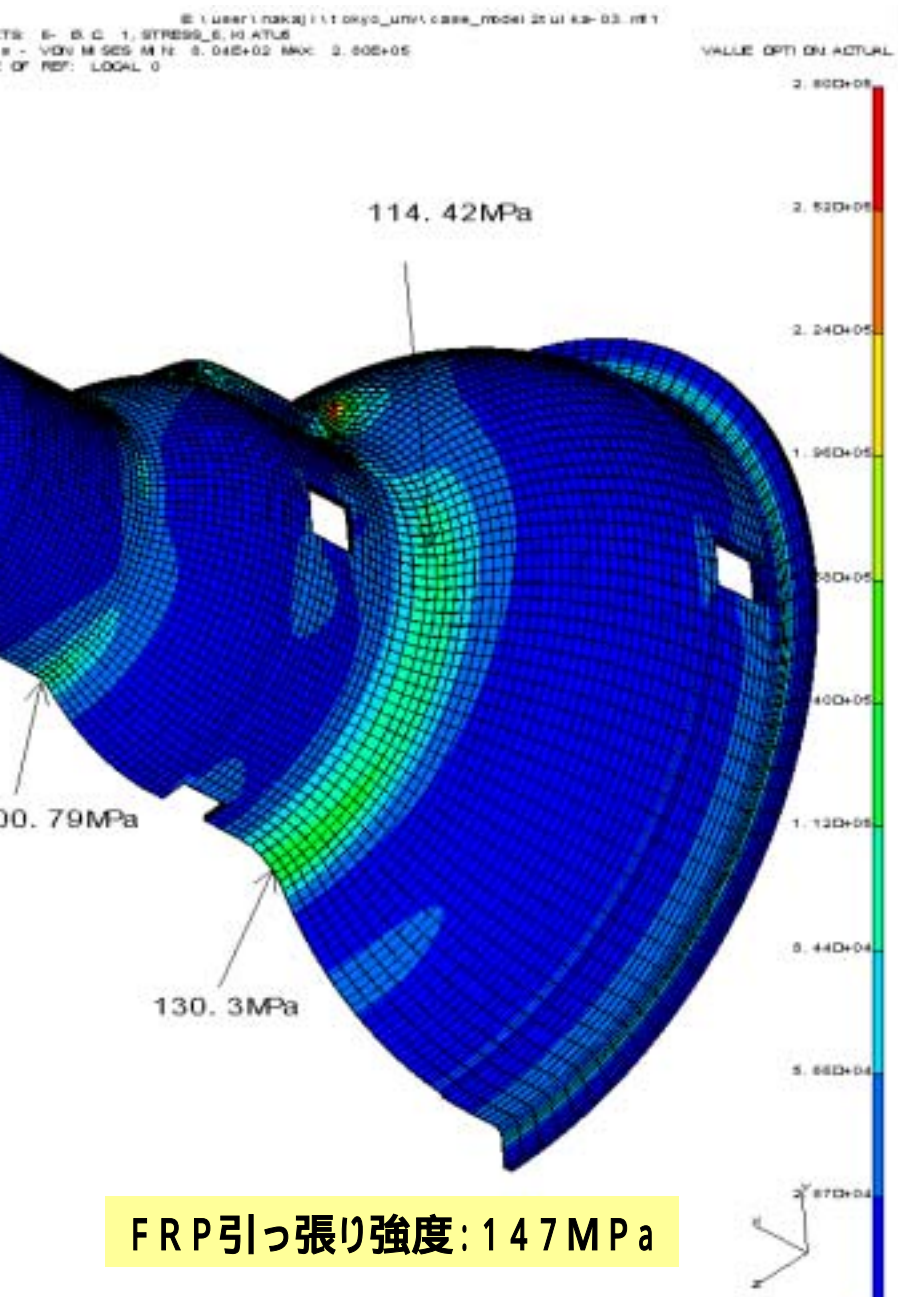


# アクリル15mmFRP5mm強度計算(4気圧)



FRP引っ張り強度: 147MPa

# アクリル15mmFRP5mm強度計算(5気圧)



FRP引っ張り強度: 147MPa

# 強度の評価

- 最大応力 (10インチ径ふくらみ部分の一部)
  - 4気圧: 224 MPa
  - 5気圧: 280 MPa
- 実証実験で4気圧に耐えた→補強がうまく効いていた
- ネック部最大応力
  - 4気圧: 104 MPa (引っぱり強度: 147 MPa)
  - 5気圧: 130 MPa
- 現在の製品でも5気圧(水深40m)でOK

FRP- 成功

020126 1809 002 0103214



# アクリルケースなし(松本案)

020126 1509 001 0040:11A

増倍管の破壊に伴い支持構造が大きく揺すられ、  
隣の増倍管2本の支持バンドが壊れて増倍管が浮き上がった

# SUS- 破壊 + 誘爆

020125 1523 001 0050788



ケースが破壊されると誘爆することがある

# 逆防爆実験

020127

1436

001

01:05:47.4



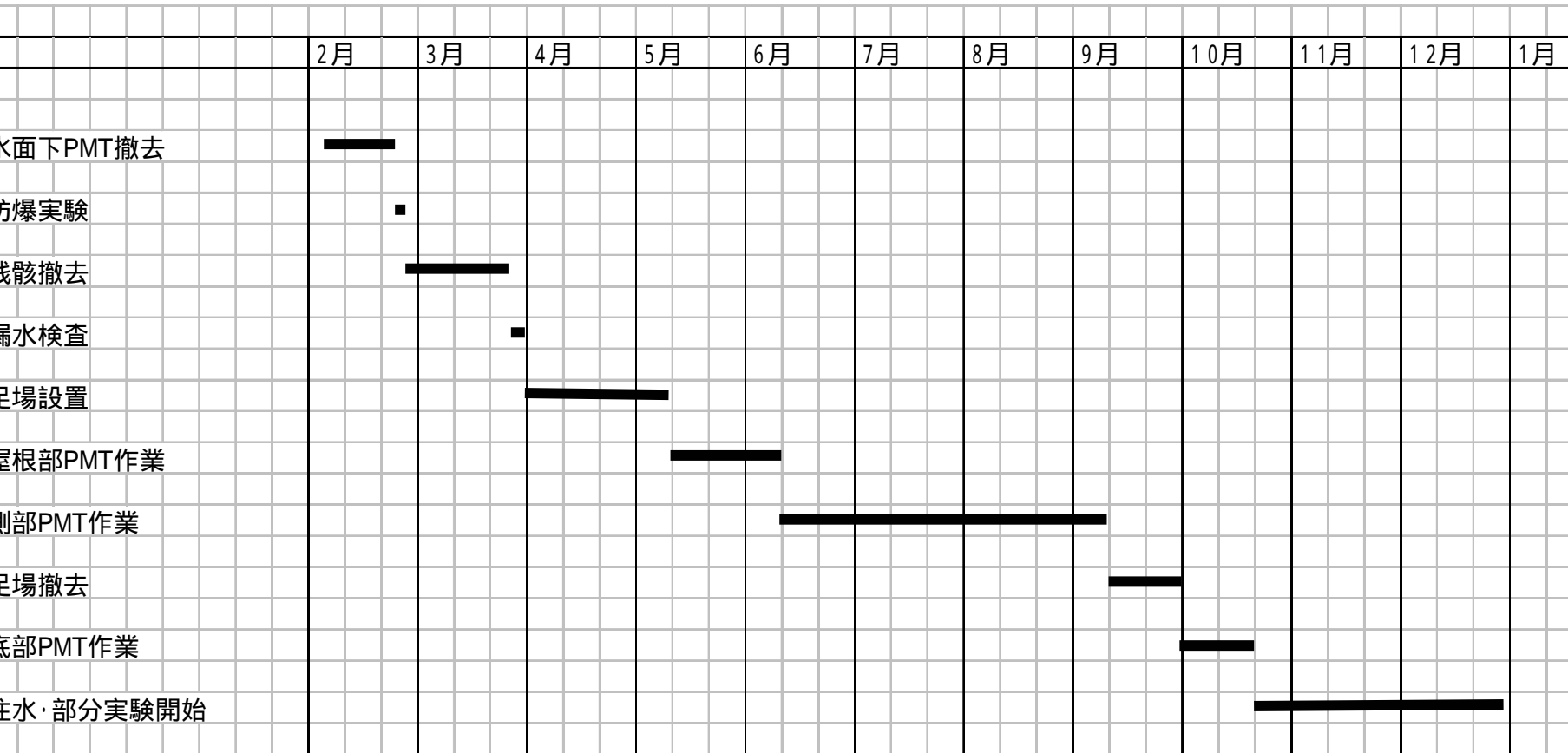
## 衝撃波防止ケースの耐衝撃波まとめ

- ケースは破壊され、ケース内の増倍管も誘爆した。
- 衝撃波圧力は0.3 MPaと小さい。
- 周囲の増倍管がすべて破壊されるまで当該増倍管の破壊は起きなかった。
- ケース内増倍管を破壊するためには、1 ~ 2 MPaの衝撃波を3回程度以上必要とする。
- 実際には、すべての増倍管がケース入りであることから、たとえ1つが大きな衝撃波を出しても隣のケース入り増倍管が誘爆を起こすことはないと考えられる。

# 水深40mでの実証実験

- 15mmアクリル+5mmFRP
- 15mm(公称)全アクリル

# 平成14年度部分再建計画(案)



## ■ 研究項目

- 大気ニュートリノの観測
- K2K実験
- ニュートリノによる超新星爆発監視

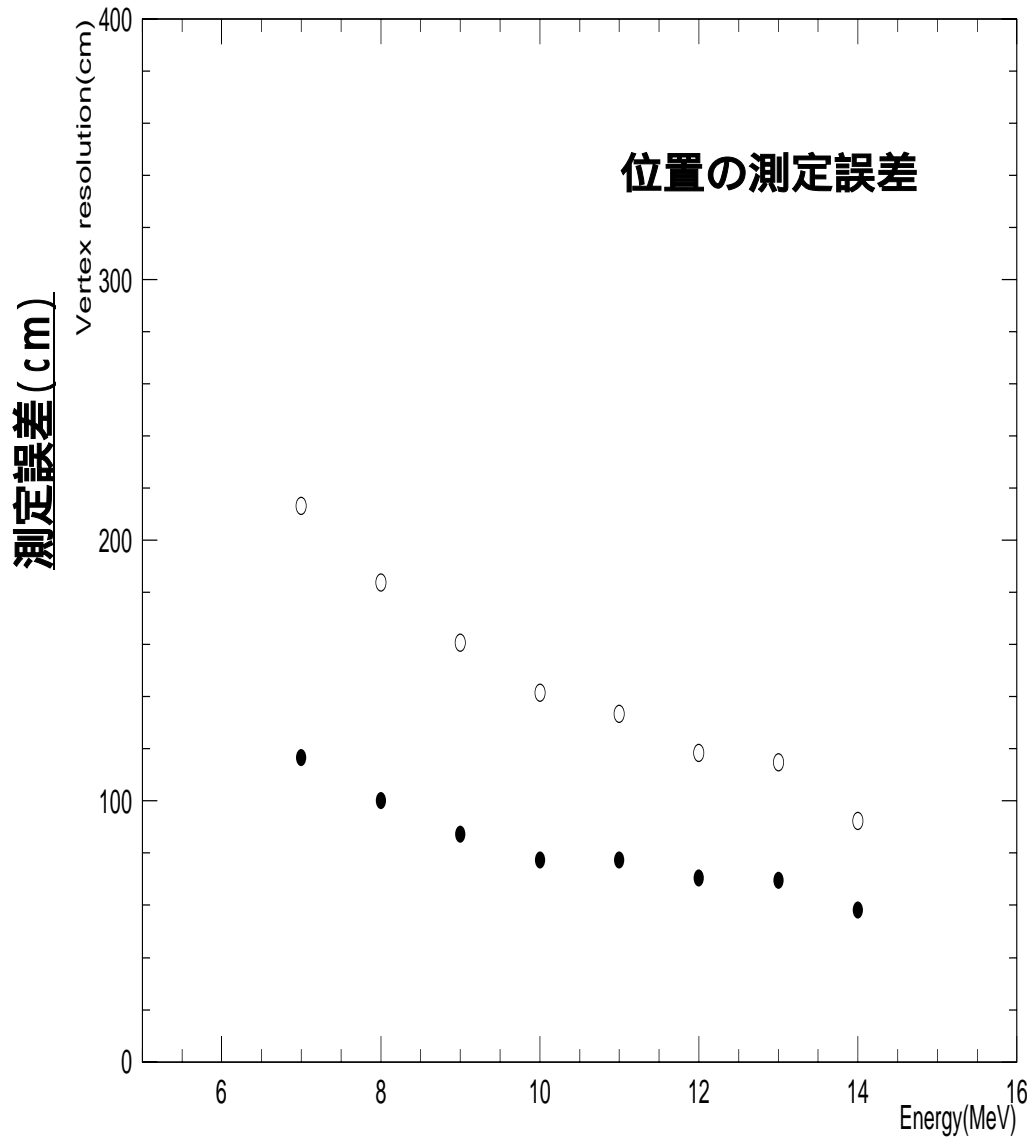
## ■ 全面復旧の必要性

- 太陽ニュートリノの精密観測
- 陽子崩壊  $p \rightarrow \nu + K^+$  の探索
- 超新星ニュートリノの精密観測
- 人工ニュートリノによる  $\nu_e$  発現実験

## 増倍管実装密度の観測量への影響

# 低エネルギー電子の位置決定誤差への影響

● 完全実装  
○ 半分実装

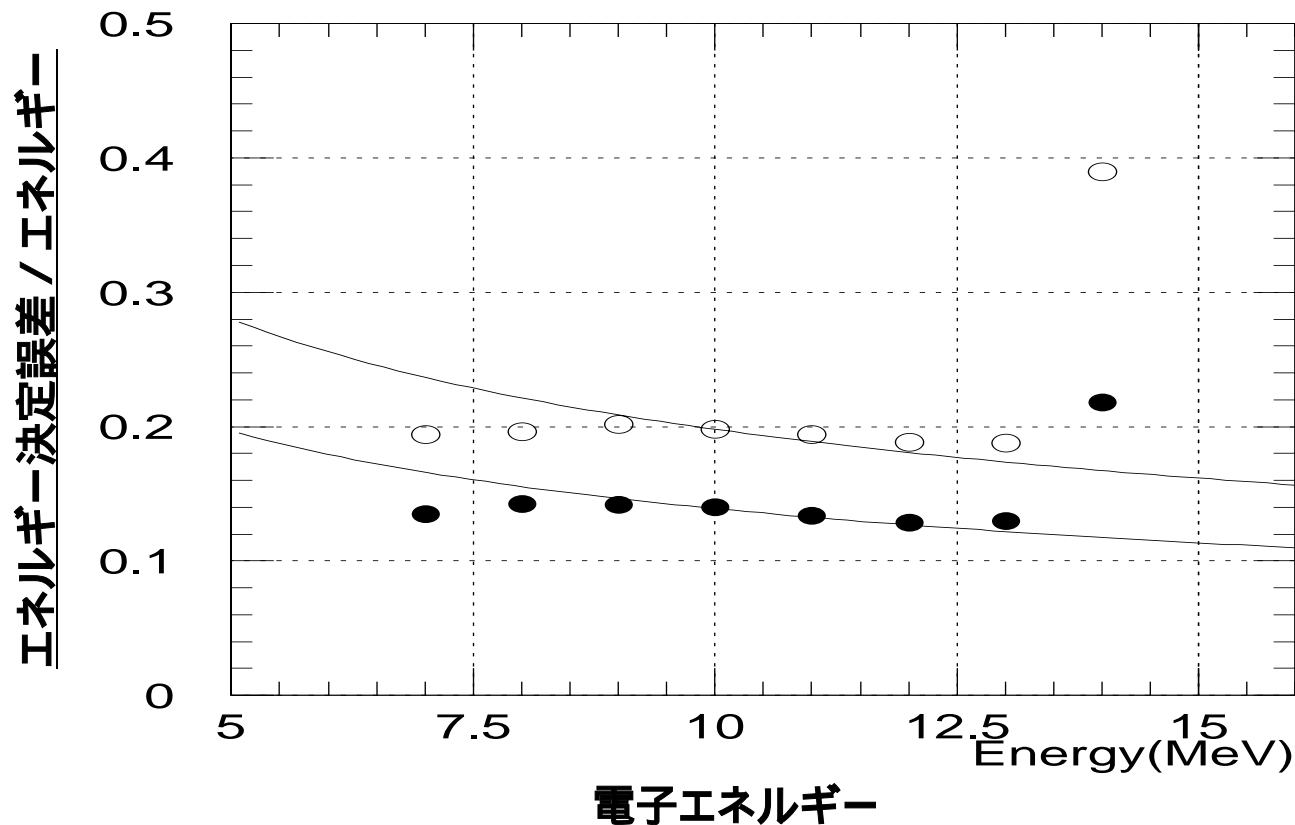


増倍管実装密度が半分になると、  
電子の位置決定誤差が約2倍悪くなる

電子エネルギー

# 低エネルギー電子のエネルギー決定誤差への影響

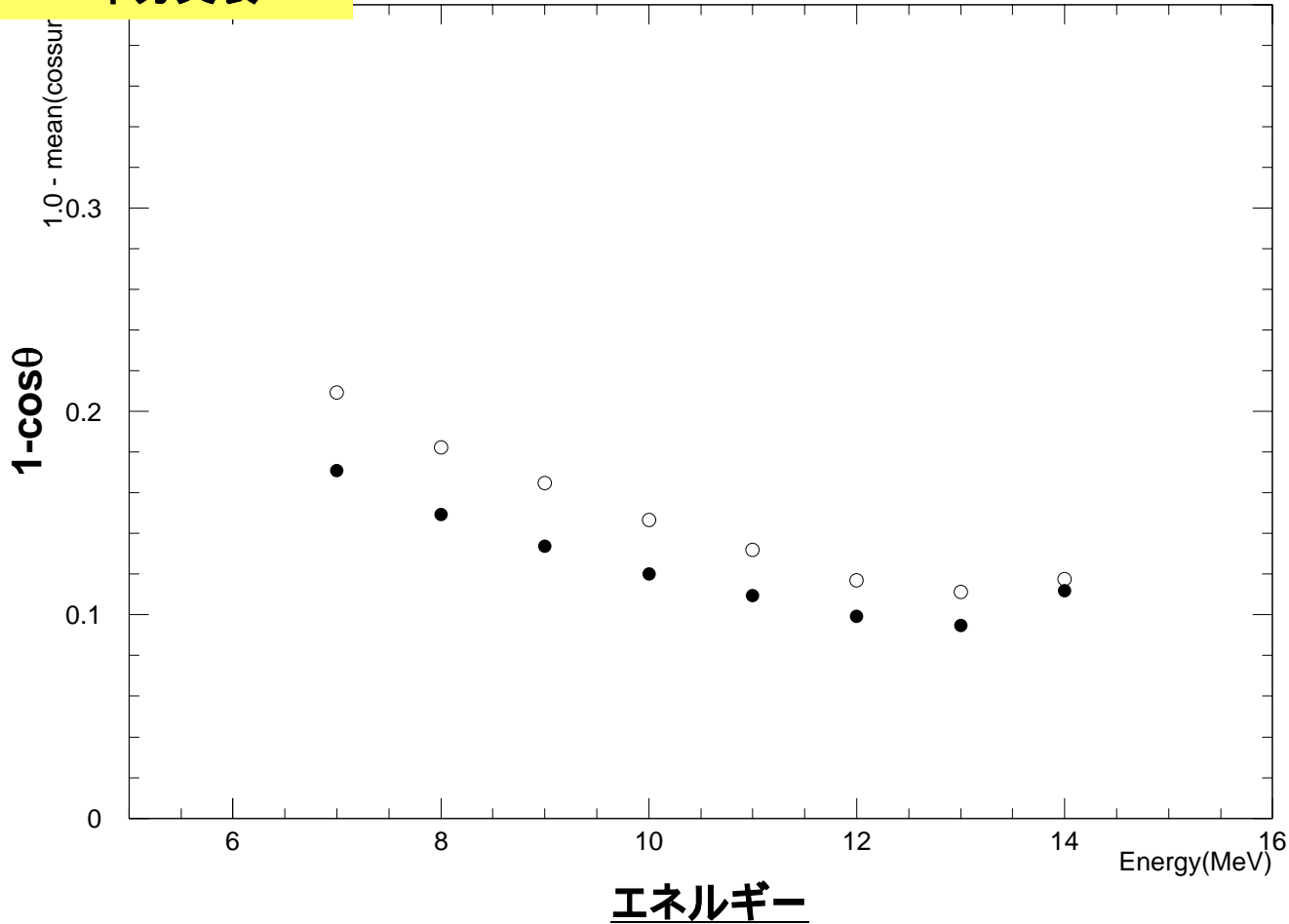
- 完全実装
- 半分実装



**注意:**  
データサンプルは5 MeV以上のみを使っているので8 MeV以下では決定誤差が小さくなっている  
増倍管実装密度が半分になるとエネルギー決定精度が40%悪化する

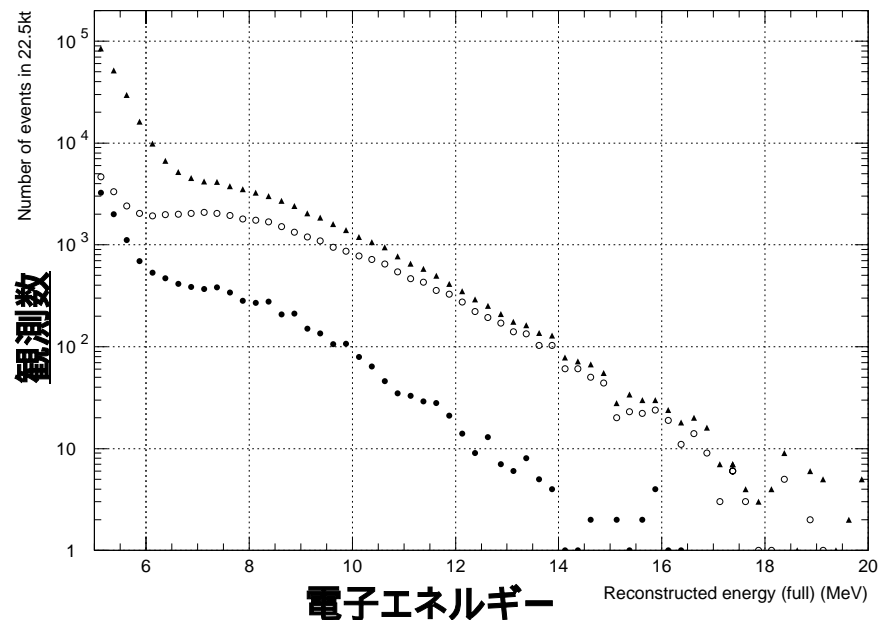
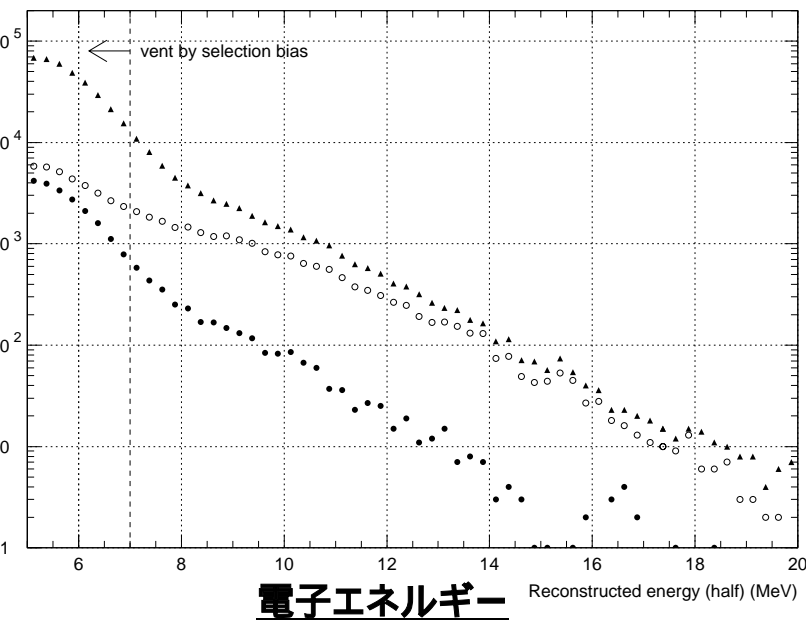
# 低エネルギー電子の方向決定誤差への影響

- 完全実装
- 半分実装



縦軸：電子の方向を0度としたとき、決定された角度の平均値を $\theta$ として、0度からのずれの量を  $1 - \cos\theta$  で表す  
増倍管実装密度を半分にすると、方向決定の誤差は10 - 20%悪化する

# 低エネルギーノイズデータの実装密度依存性



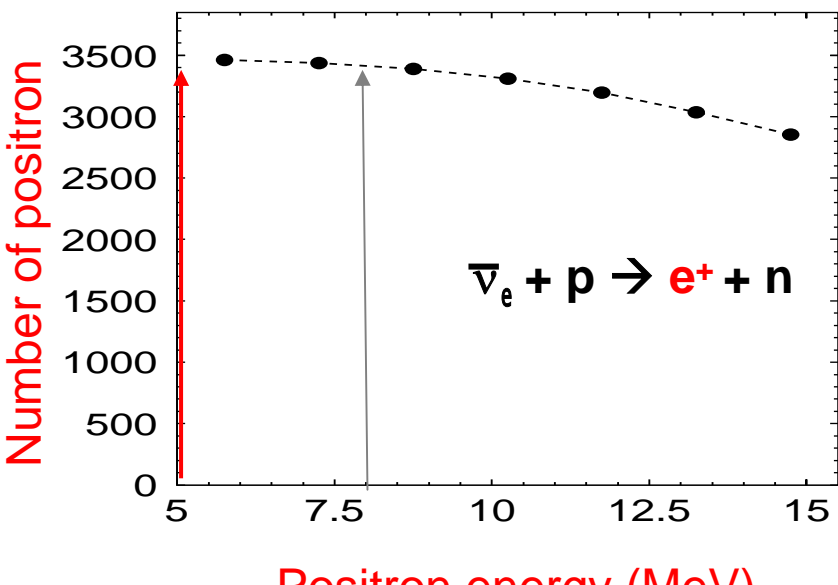
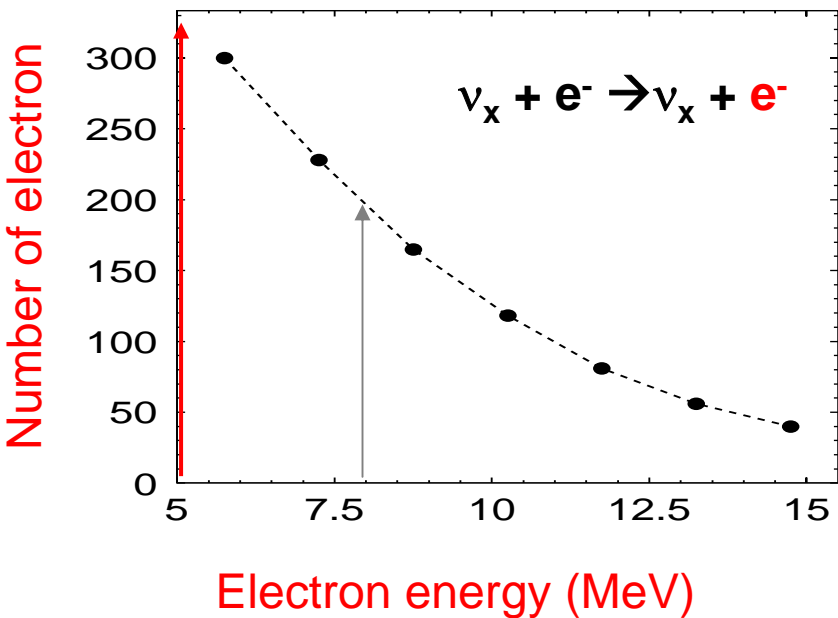
両図中3種類のデータ: 上からカット前、外部からのガンマ線カット、ミューオン由来電子カットを行った後に残ったデータのエネルギースペクトル。太陽ニュートリノ信号はこのデータの中に隠れている。

右図: 増倍管完全実装時のデータ (5 MeV以上)。

左図: 増倍管半分実装時のデータ。ただし、これは完全実装時データで増倍管を半分に減らしたデータを元で作成。5 MeVカットがデータにあるため、8 MeV以下のデータのなまりは本当ではなく5 MeVにかけて指数関数的に増大するはずである。

増倍管実装密度が半分になると、エネルギー分解能が悪くなるため低エネルギーノイズが高エネルギー側にしみこんできて、低エネルギーデータの質が悪化する。このため、解析に使えるデータは、完全実装時の5 MeV以上から8 MeV以上に制限されることがわかる。

# 超新星ニュートリノの観測数への影響



## ■ 最低検出エネルギー

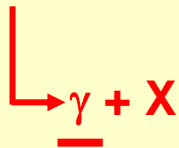
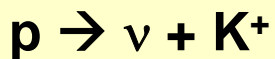
- 完全実装: 5MeV
- 半分実装: ~8MeV

■  $\nu_e$ と $\nu_x(x=\mu, \tau)$ の測定は上図のような電子散乱を使って行われる。標的電子の質量が軽いいため、電子のエネルギースペクトルは低エネルギーに偏る。このため、最低検出エネルギーが高くなると、観測数が急速に減ってくる。増倍管の実装密度が半分になると最低検出エネルギーが5 MeVから8 MeVにあがるため、観測数は約半分に減ってしまう(上図)。

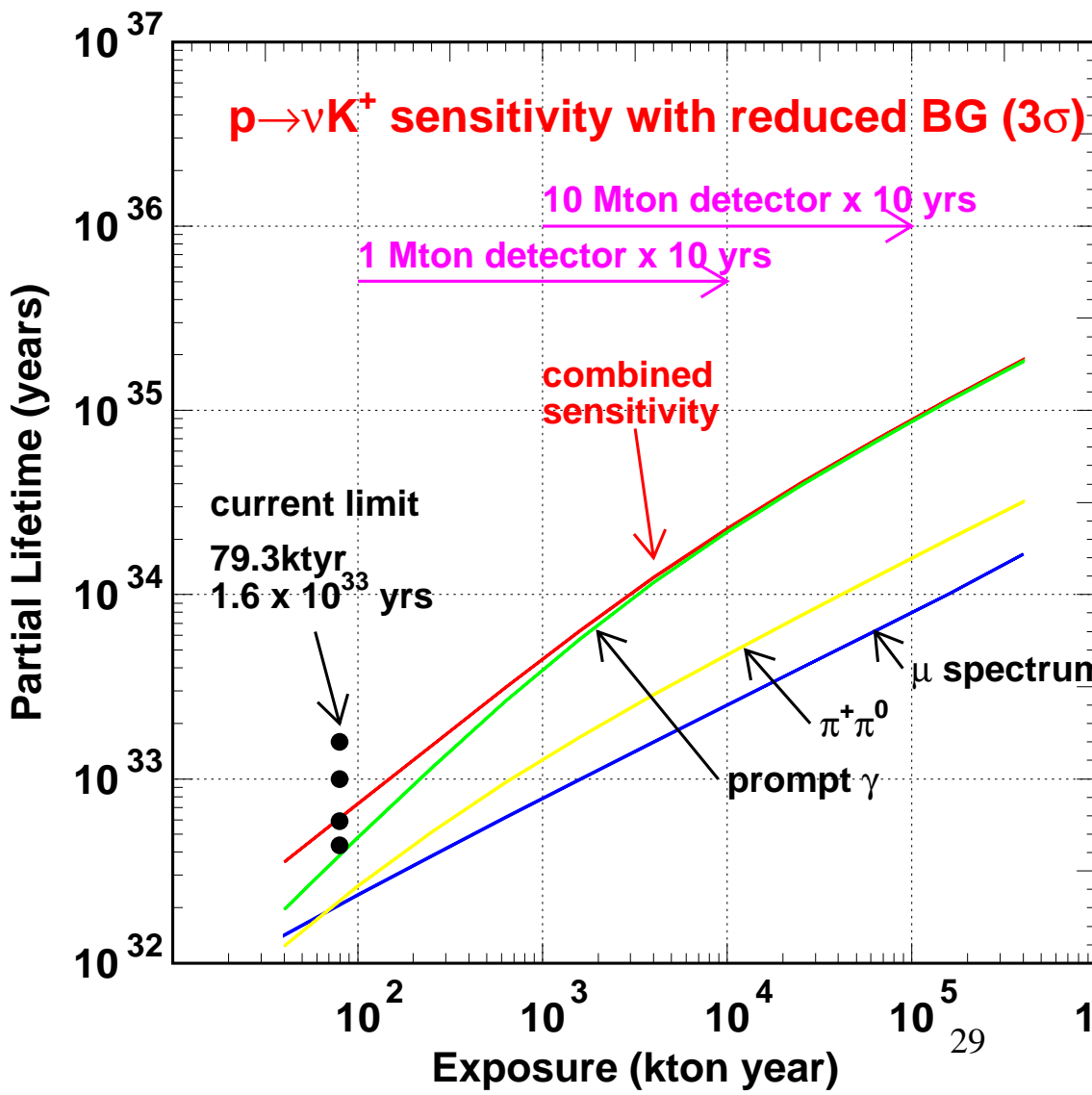
■ この影響は、超新星の方向決定精度やニュートリノ振動の影響を解明するのに悪影響を及ぼす。

■ 反電子ニュートリノは陽子との反応を観測に使うため、信号のエネルギー依存性はあまりなく、従って実装密度の影響はあまりない(下図)。

# 陽子崩壊



ガンマ線のエネルギーは約6 MeV。増倍管の実装密度が半分になるとこのガンマ線をとらえることができない。



# 加速器ニュートリノのニュートリノ振動による $\nu_e$ 発現現象への影響

$\nu_e$ 発現に対するノイズは $\pi^0$ が  
主要な成分である。

□ : 完全実装

+ : 半分実装

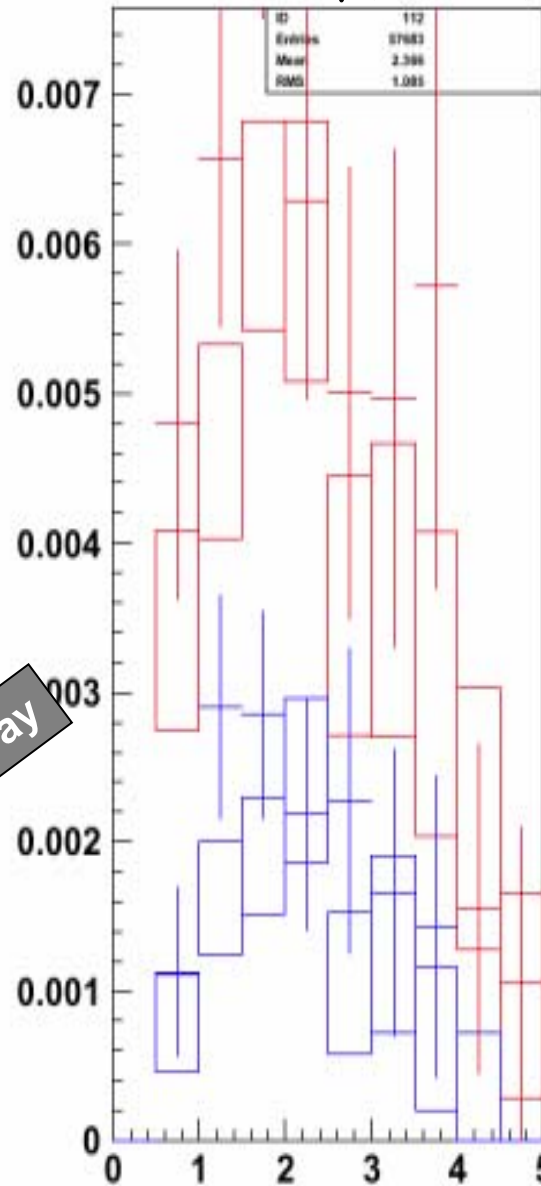
ノイズシグナルの排除効率

完全実装:  $\varepsilon(\text{BG}) \sim 0.0016$

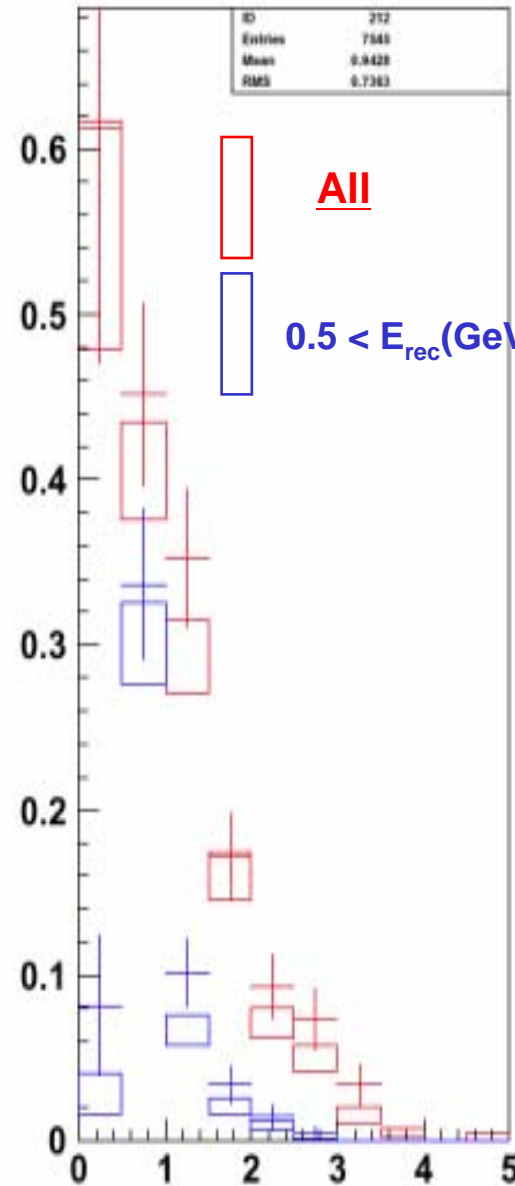
半分実装:  $\sim 0.0023$

Study under way

$\nu_\mu(\text{CC}+\text{NC})$



$\nu_e(\text{CC})$



$E_\nu$  (GeV)

$E_\nu$  (GeV)

- 増倍管の実装密度が半分になると、
  - 低エネルギー電子の観測量は、その決定精度が大きく悪化する。
  - 太陽ニュートリノ観測では、ノイズシグナルが高エネルギー領域までしみこむため、最低検出エネルギーを5 MeVから8 MeVにあげざるを得ない。このため、太陽ニュートリノ観測数の大幅な減少と、エネルギースペクトルの測定範囲が狭まり、得られる観測結果が大きく制限される。
  - 同じく最低検出エネルギーの上昇のため、超新星ニュートリノの電子型、ミュー・タウ型成分の観測数が半減する。このため、超新星の方向の決定精度が悪化し、ニュートリノ振動の影響の解明が困難になる。
  - 陽子崩壊  $p \rightarrow \nu + K^+$  の検出に本質的な6 MeVガンマ線の検出ができなくなり、陽子崩壊の探索が不可能になる。
  - 加速器ニュートリノによる電子ニュートリノ発現現象を同定する際、じゃまとなるノイズが増加し、当発現現象の発見が困難になる。

# 全面復旧計画(案)

平成	14年	15年	16年	17年	18年	19年	20年
部分復旧による観測	■■■■■						
増倍管R3600-5購入		■■■■■					
取り付け金具等購入					■■■		
排水					■		
増倍管取り付け						■■■	
注水						■■■	
観測開始						■■■■■	