XMASS実験と将来

Y. Suzuki

２００１年９月１６日

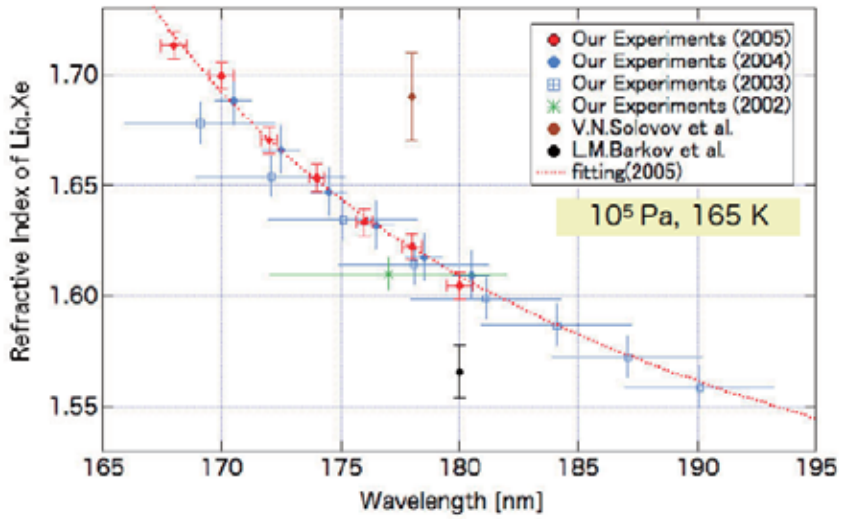
宇宙線将来計画研究会

in Kashiwa, Japan

XMASS実験とは

- 液体キセノンを用いた宇宙素粒子検出装置
  - ニュートリノやダークマターの反応により起こる、キセノンの発光を光センサーでとらえる。
- 液体キセノンの性質
  - 沸点：165.1 度
  - 融点：161.4 度
  - 密度～3.0 g
  - Z=54
  - 発光量　42 photons /keV
  - 発光波長　~175 nm

S. Nakamura etc.

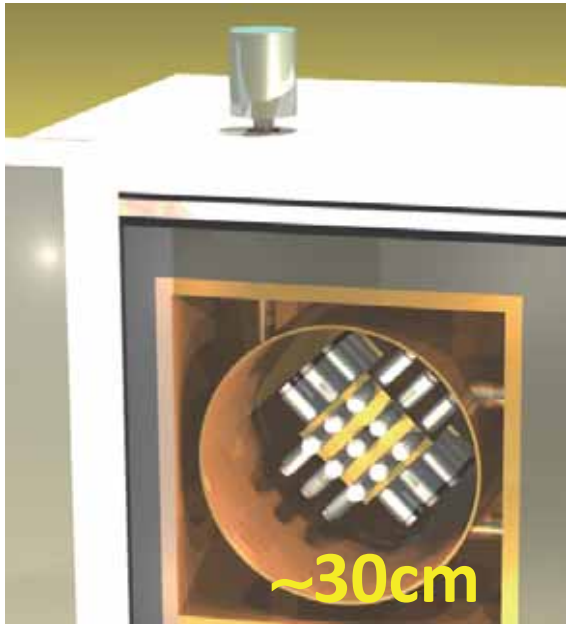


屈折率の測定

屈折率の誤差	± 0.007
波長の誤差	± 0.04　nm

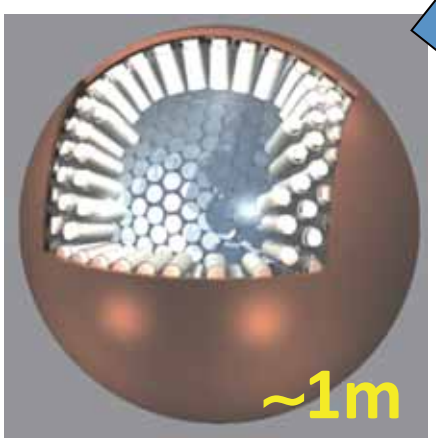
XMASS実験の進め方

XMASS-I.5
5 ton detector
(FV 1ton)
Dark Matter

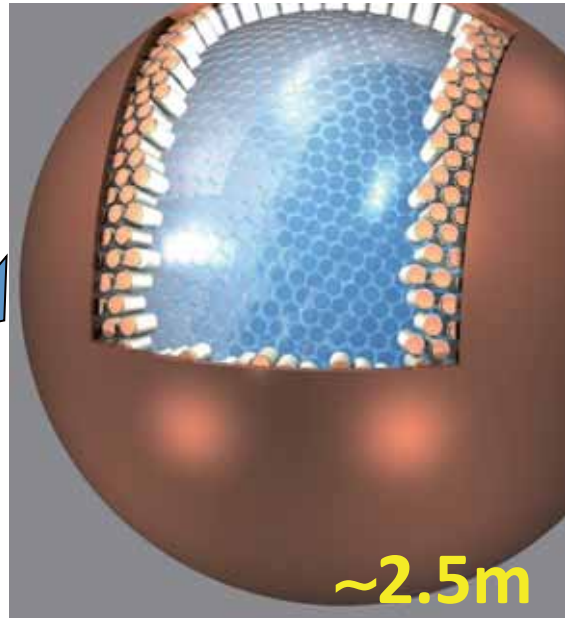


Prototype detector
R&D

Confirmation of the feasibilities of the 800kg detector



XMASS-I
800kg detector
(FV 100kg)
Dark matter



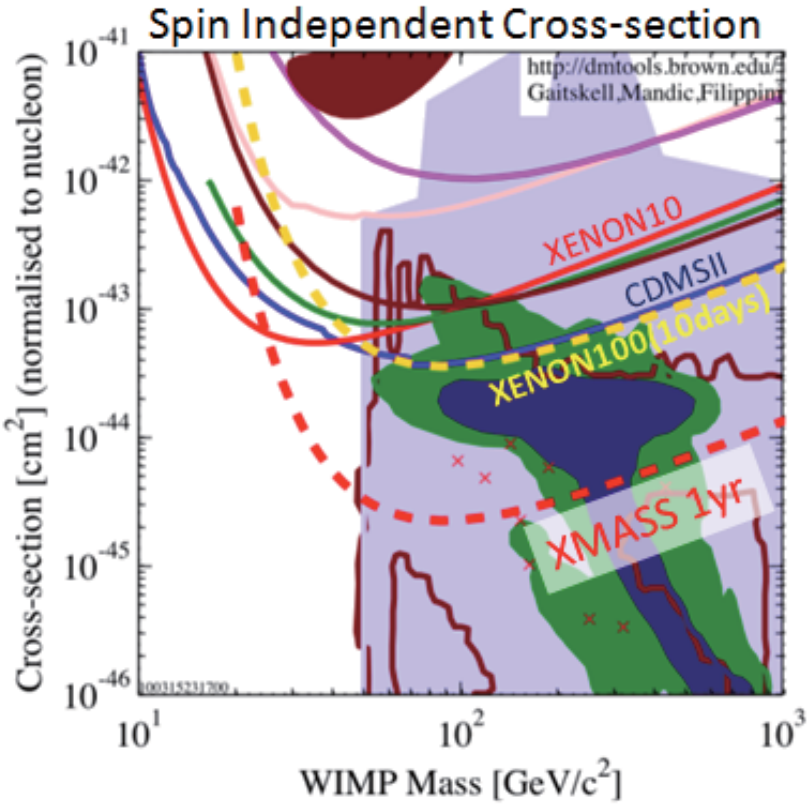
XMASS II
23 ton detector
(FV 10ton)
Dark matter
pp-solar neutrinos
$\nu+e \rightarrow \nu+e$
$0\nu\beta\beta$ $^{136}Xe \rightarrow ^{136}Ba+2e$

XMASS-I

研究の目的

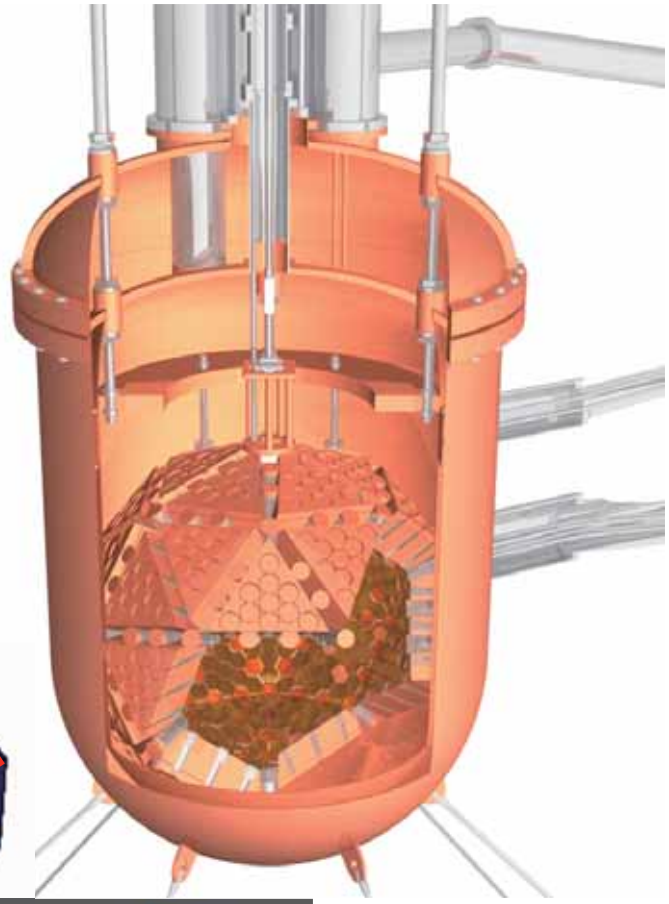
- WIMPs（Weakly Interacting Massive Particles）ダークマターの直接探索を行う。
- 現在、到達した感度の～20～50倍の感度で探索
  - WIMPs　SI　$2\times10^{-45}cm^2$（1年）
  - ＜　$10^{-45}cm^2$（5年）

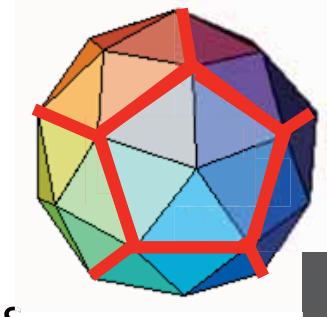
到達感度

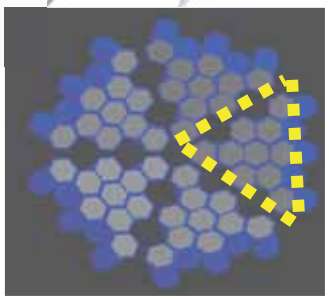


実験装置

- 内容量857kgの液体キセノン検出器（有効質量：100kg)
- 全体で、1．3トンのキセノンを使用
- 真空容器におさめられる
- 壁面に光センサー642本（5 p.e./ keV）64%光電被覆
- PMTホルダー
  - **Pentakis-dodecahedron**
  - 12 pentagonal pyramids
  - Each pyramid ← 5 triangles
- 半径: 39~42 cm





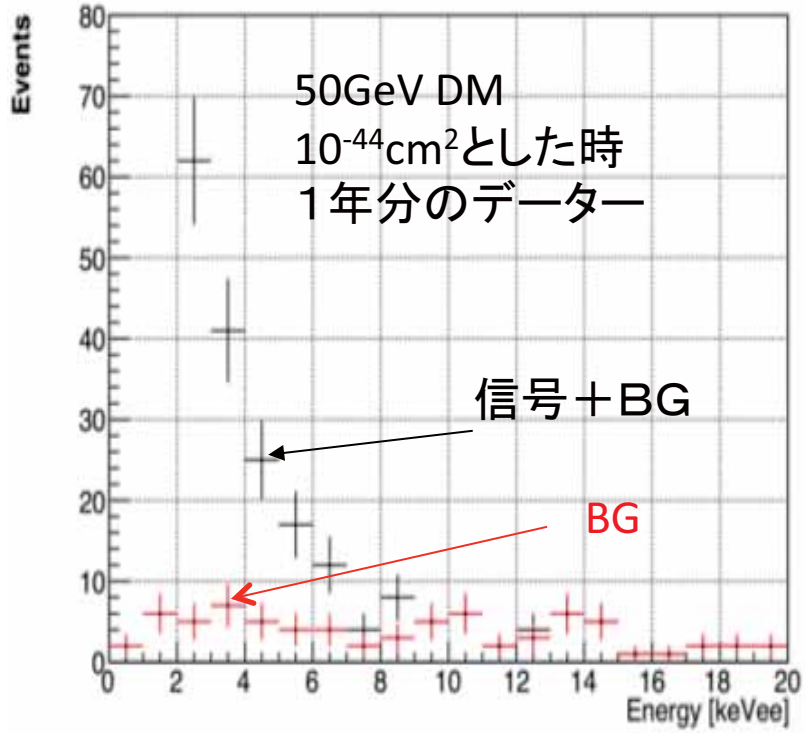


実験装置

- 真空容器は、直径10mの純水水槽の中央に設置される。
- 水槽は、Active Veto
- 20インチの増倍管72本を配置

ダークマターの検出原理

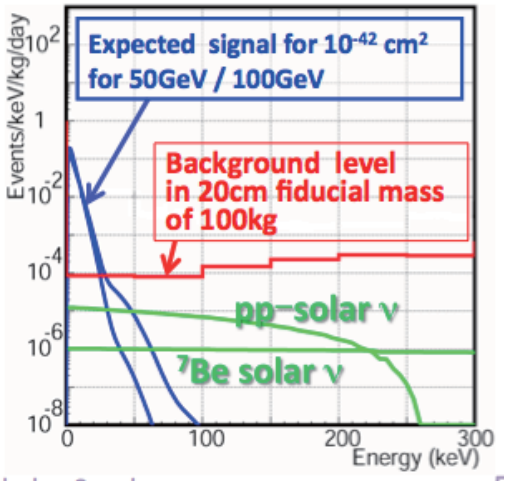
- ダークマターによる核反跳からの蛍光を検出
- ダークマターからの信号：～10keV以下にExcess を作る
- 閾値は、5keV以下



実験のキーワード：低バックグラウンド

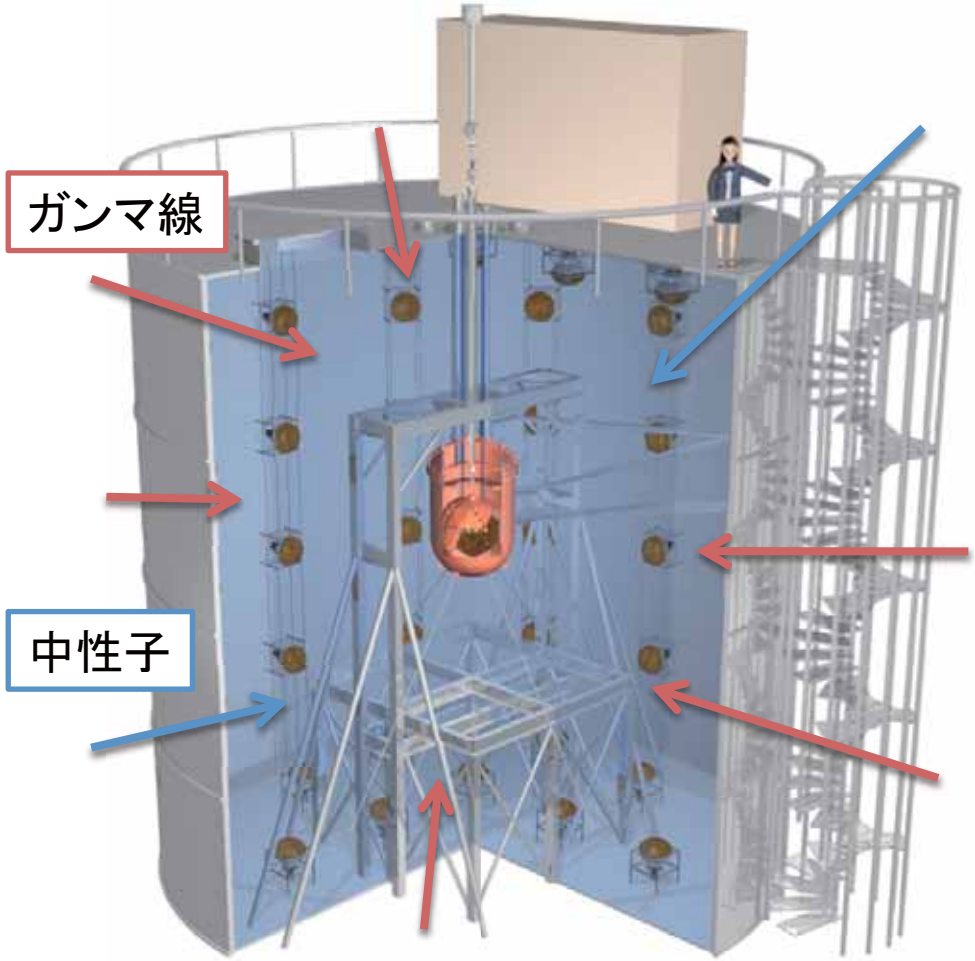
- **バックグラウンド：**
  < 10^{-4} events/keV/kg/day
  - 10日に1事象 （100kg, ΔE~10 keV)

- **内部BG**
  - **Kr**
    - 蒸留塔による分留
  - **Rn**
    - 活性炭による除去
      - 気相での除去
      - 液相での除去
  - Cosmo-genics
    - Active Veto, circulation

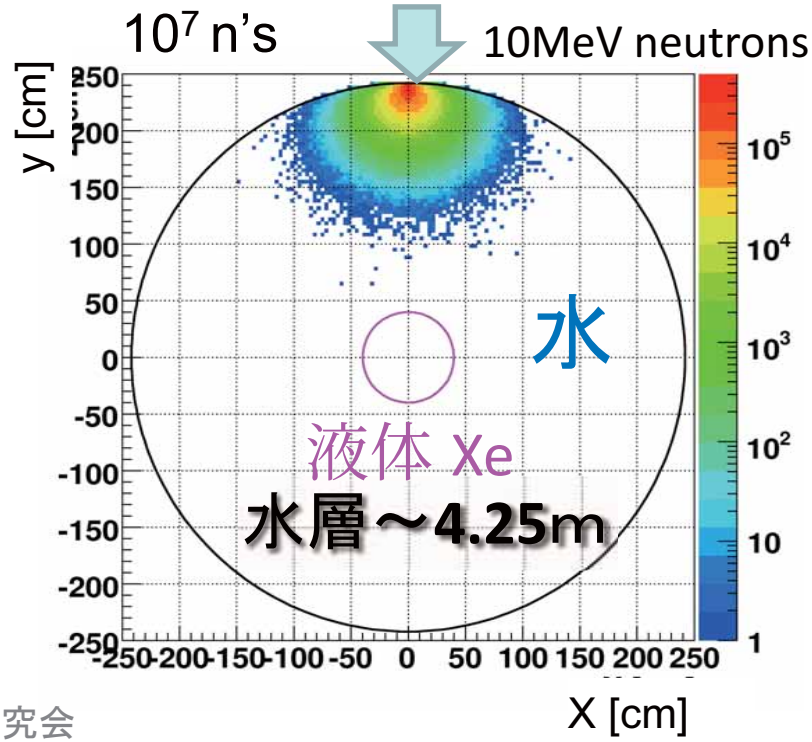


- **外部BG**
  - 岩盤からの環境中性子、カンマ線等BG
    - 水槽により遮蔽： ～4mの水層
  - 検出器本体からのBG
    - 素材の吟味
  - 光検出器からのBG
    - 低バックグラウンドPMTの開発
  - キセノンの自己遮蔽
    - 内部100kg（20cm半径）のみ
    - すべての外部BGの低減

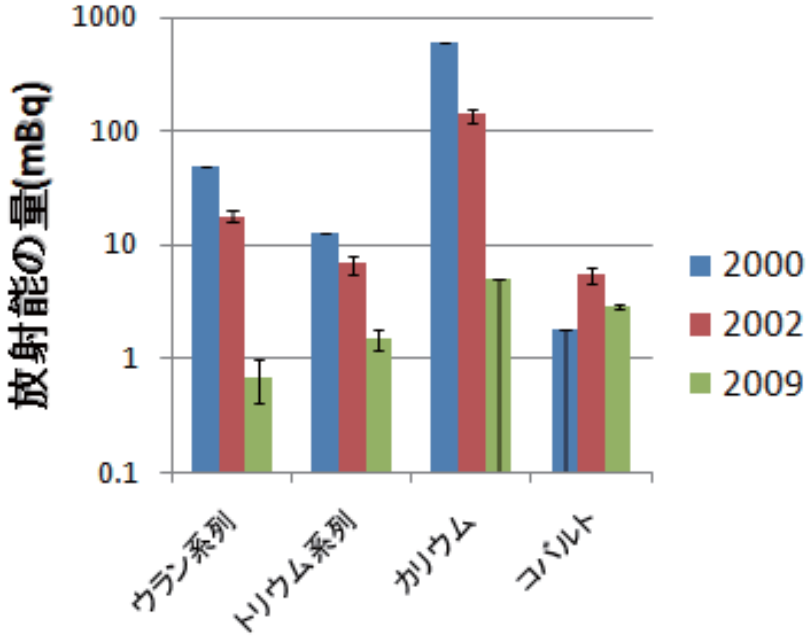
水槽による遮蔽



- 遮蔽のシミュレーション
- ϕ_n(Kamioka)=
  (1.2+0.1) x10^{-6} /cm^2/sec
- n events in Liq. Xenon w/ 200cm water
  << 10^{-4} counts/day/kg



低バックグラウンドPMTの開発



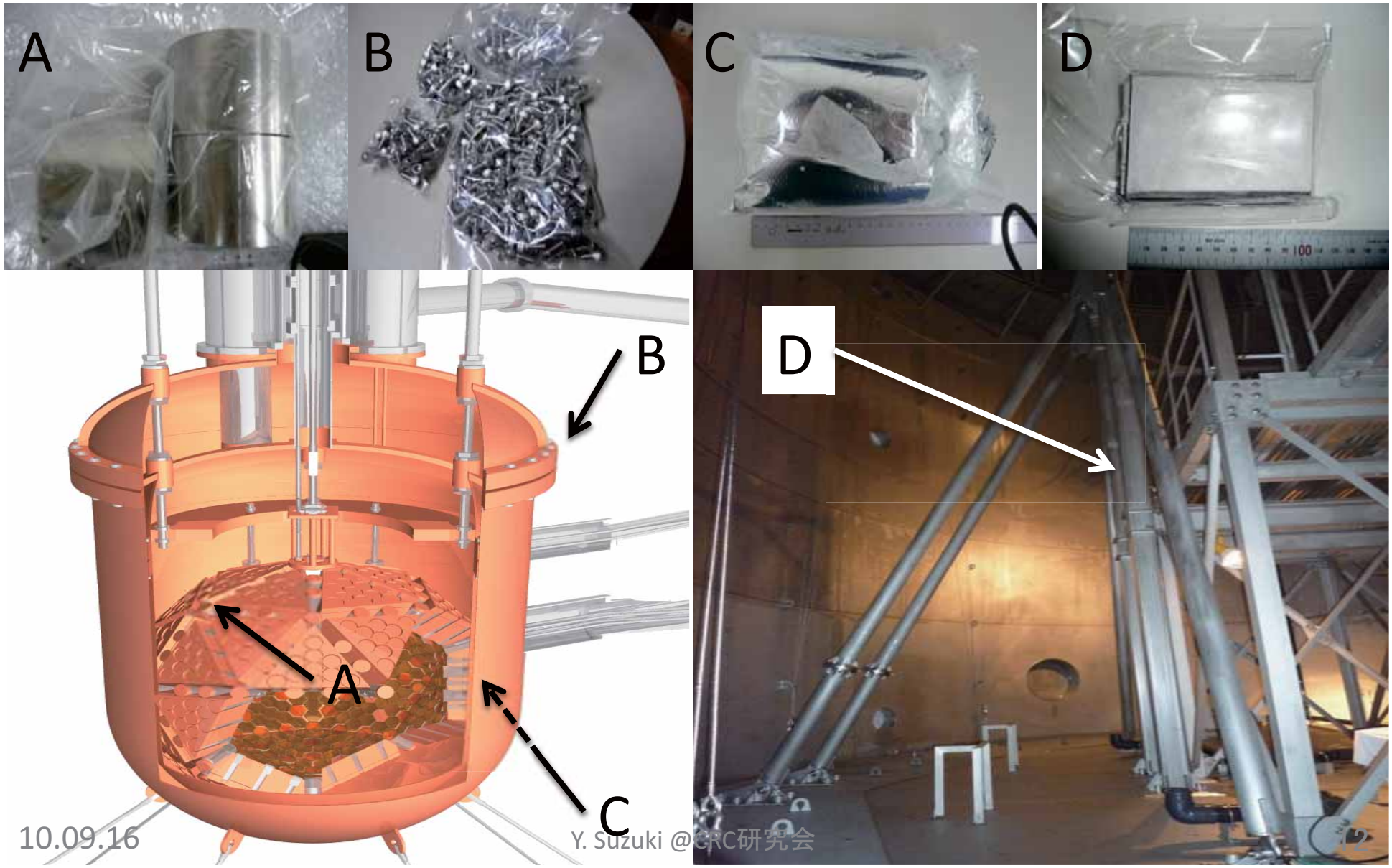
PMTタイプ	ウラン系列 (mBq)	トリウム系列 (mBq)	カリウム (mBq)	コバルト60 (mBq)
2000年版	50	13	610	<1.8
2002年版	18+/-2	6.9+/-1.3	140+/-20	5.5+/-0.9
2009年版 R10789	0.7+/-0.28	1.5+/-0.31	<5.1	2.9+/-0.16

- これまでの開発品よりさらに10分の1のBG

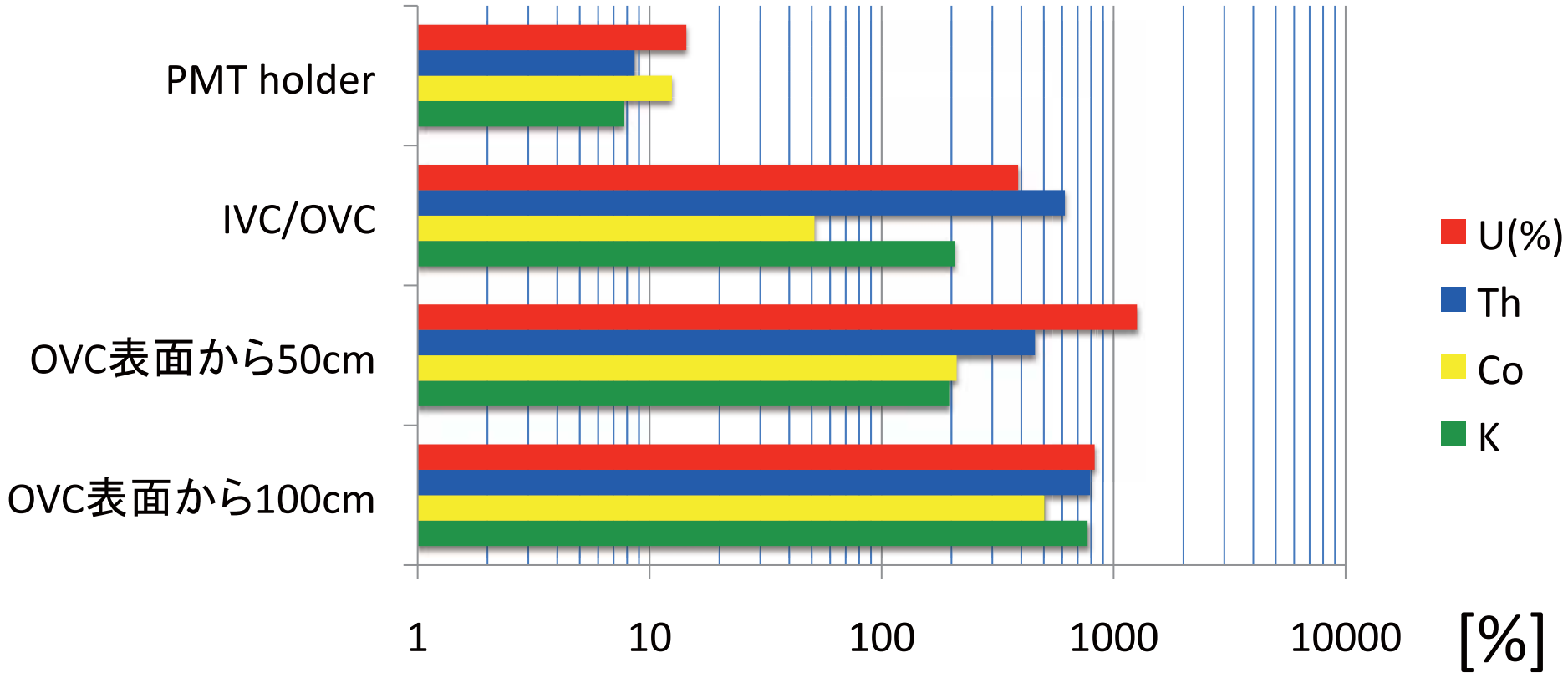
検出器素材の選択

- 250以上の部品に対する、徹底した検出器部品のスクリーニング
- 低バックグラウンドの102部品を実際に選択

RIの大きかった代表的な材料



PMT以外の検出器材料からの放射線の強さ（PMT642個との比）

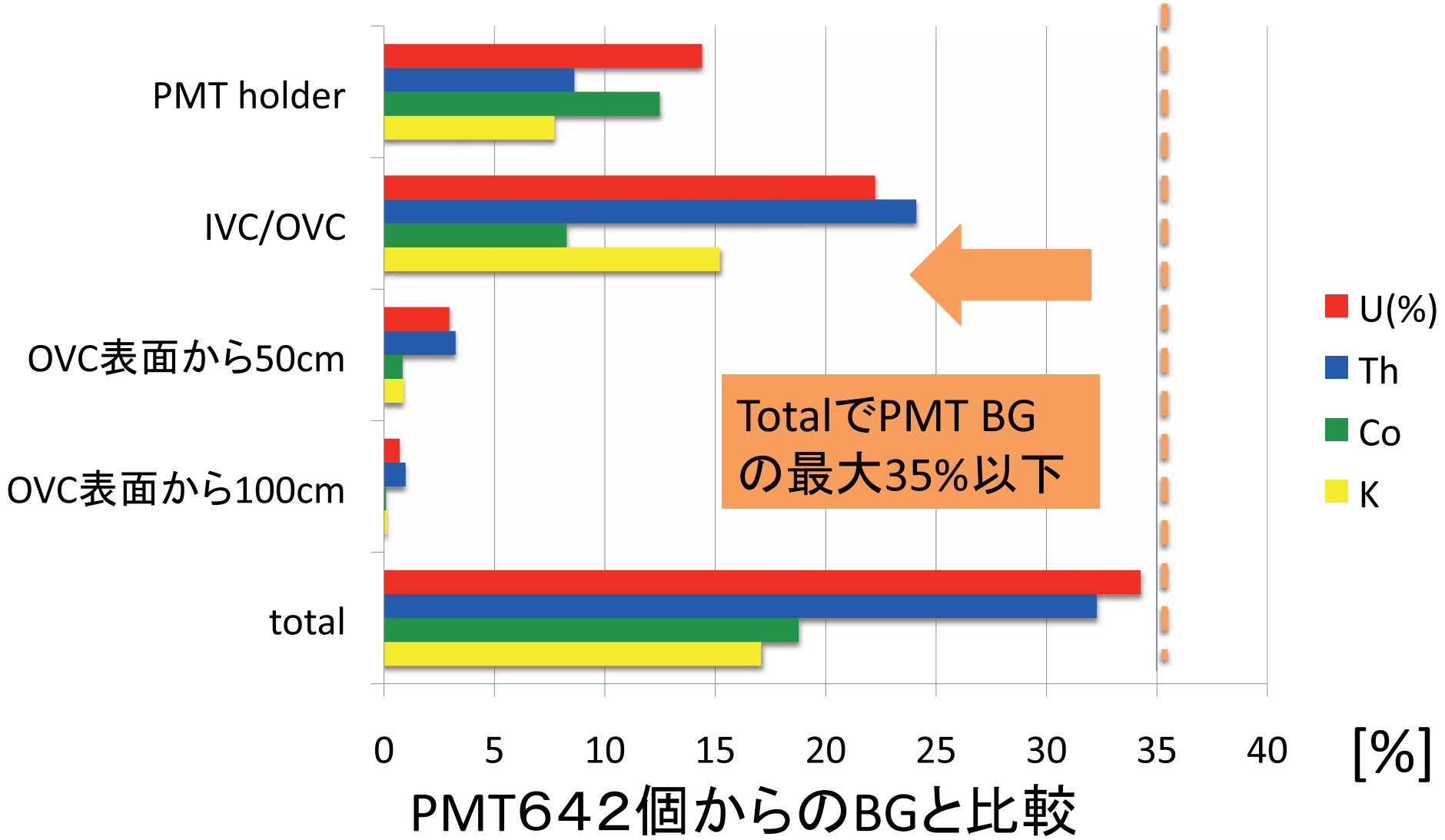


PMT642個分との放射能との比

位置による、効果の補正なし

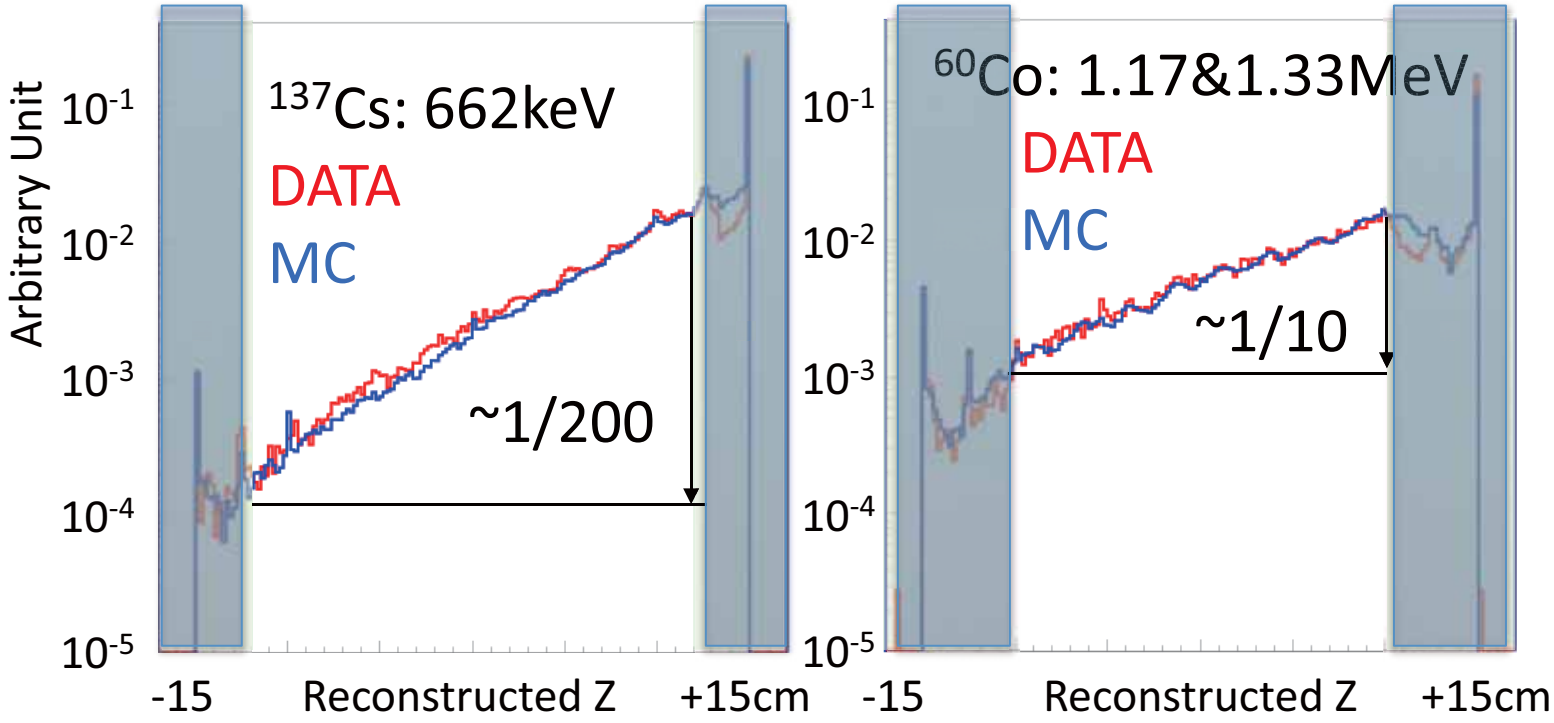
PMT以外の検出器材料からの放射線の強さ

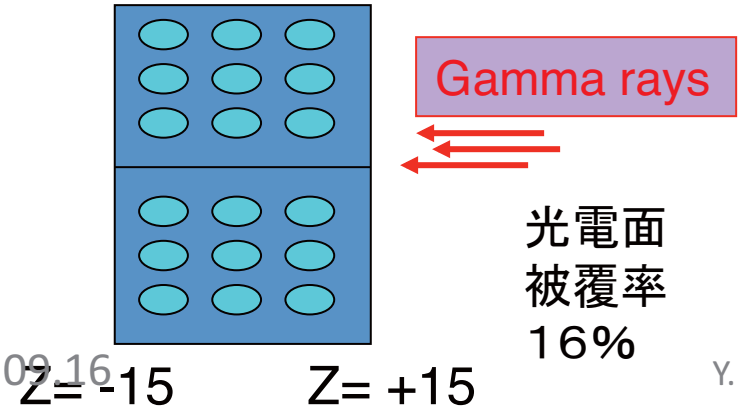
距離と間にある物質による遮蔽効果を考慮した場合



Self-shield (自己遮蔽)

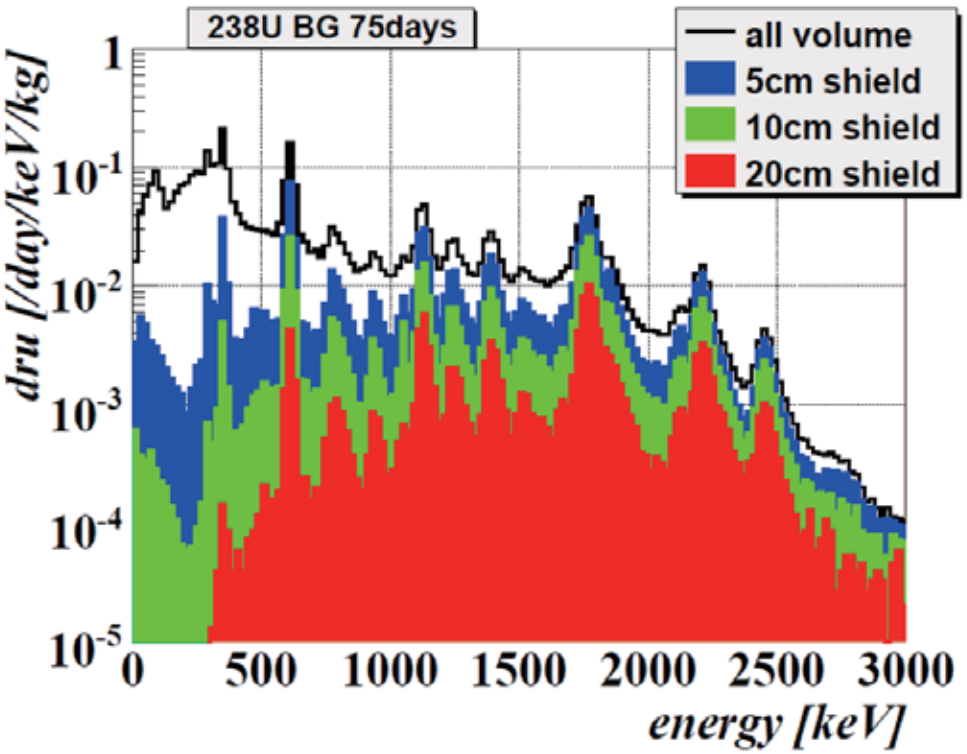
プロトタイプ検出器





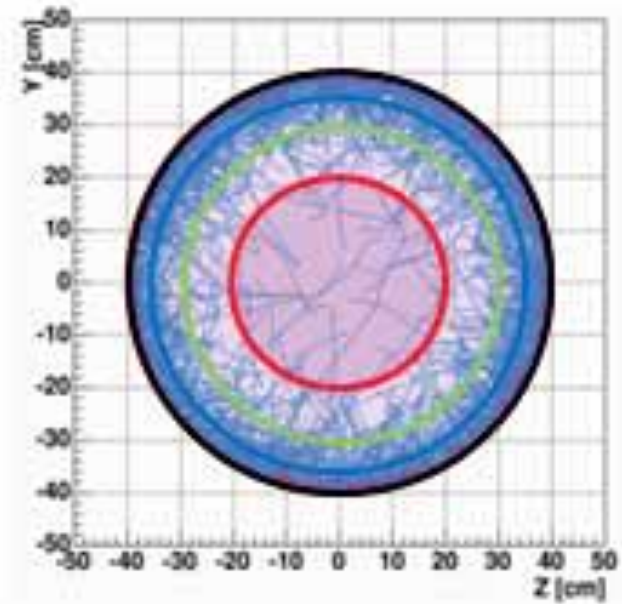
- データとMCでよく一致。
- 自己遮蔽効果は期待通り。
- 光電子数 ~ 0.8p.e./keV

External Backgrounds from PMTs



- キセノンの自己遮蔽
  - 内部100kg（20cm半径）のみ（ピンクの領域）
  - 外部BGの低減：1万分の1以下 (<300keV)
  - $<10^{-5}$/day/keV/kg

^{238}U系列からのガンマ線



Neutron backgrounds

- ***Neutrons from PMT***
  - (α, n) reaction
  - Spontaneous fission of ^{238}U

Scaled from M.J. Carson, et al., hep-ex/0404042

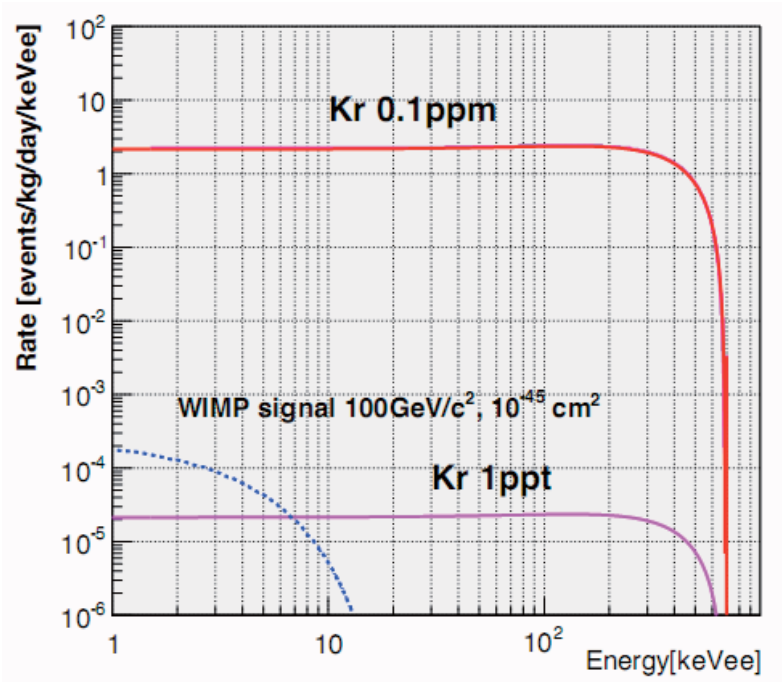
857kg Xenon + 642new Hex. PMTs

	U [ppb]	Th [ppb]	mass [/PMT]	Rate(U) [/kg/year]	Rate (Th) [/kg/year]
Quarts	<0.79	<1.69	11 g	<0.002	<0.0008
Metals	<0.18	<0.96	123 g	<0.003	<0.002

Total < 0.008 /kg/year (< 2.2×10^{-5} /kg/day)

蒸留塔によるKrの分留

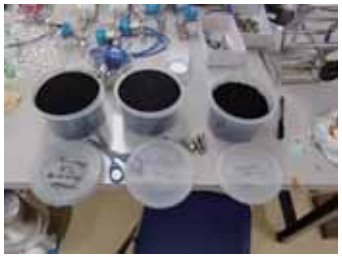
4.1kg/時：1トンの処理でも12日
(昨日から開始)
市販の0.1ppmを1ppt以下に低減
（現在計測中）



循環システム（気相、液相）

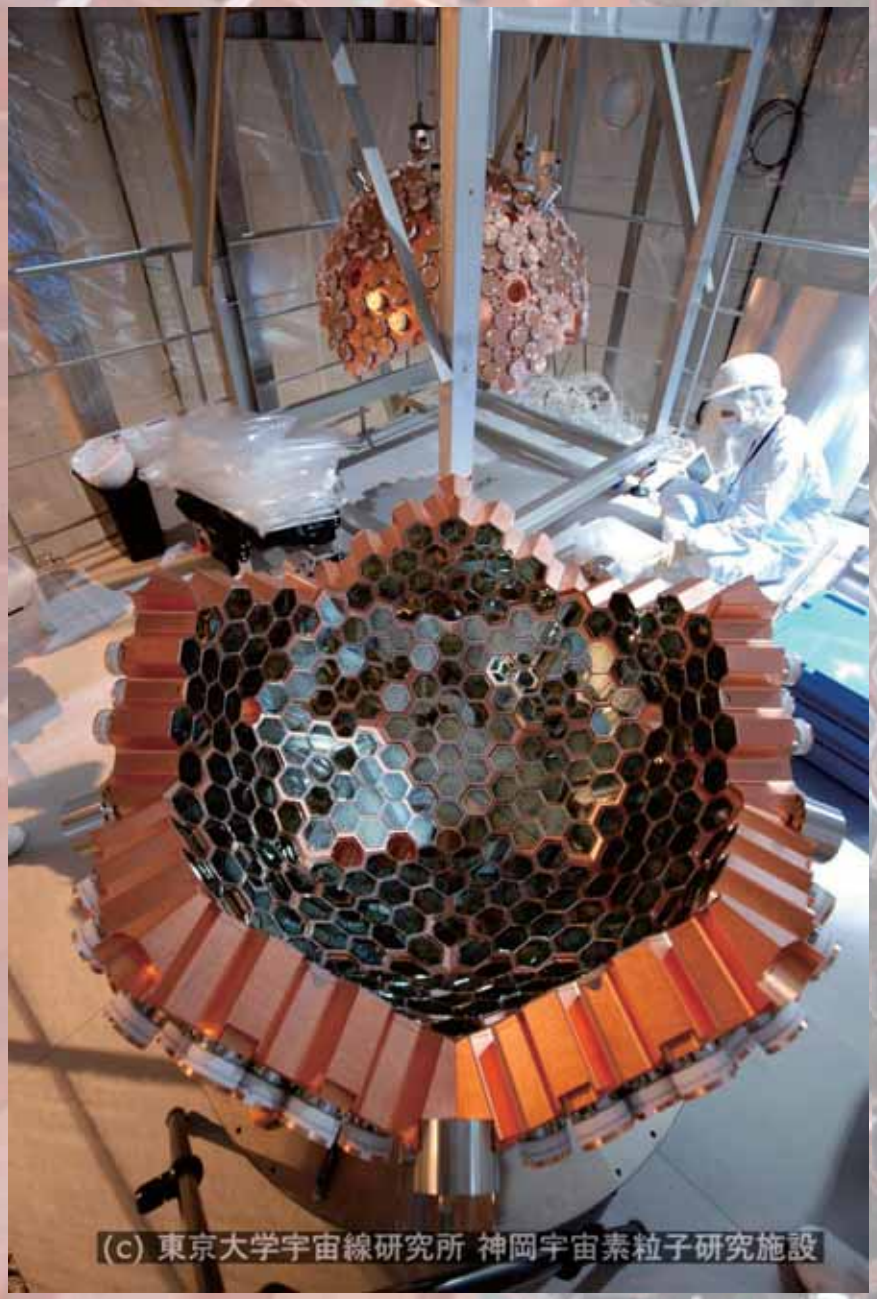
液相:　現在開発中

- フイルター
  - 微粒子の除去
- モレキュラーシーブ
  - 水分の除去
- 活性炭
  - Rnの除去



U/Th contamination in liq. Xenon

- **^{238}U = (9±6) x10^{-14} g/g (proto-type det.)**
  ➔<u>Target: ^{238}U < 1x10^{-14} g/g</u>
  (~1decay/100kg/d)
- **^{232}Th < 23 x10^{-14} g/g (proto-type det.)**
  ➔<u>Target: ^{232}Th: <2x10^{-14} g/g</u>

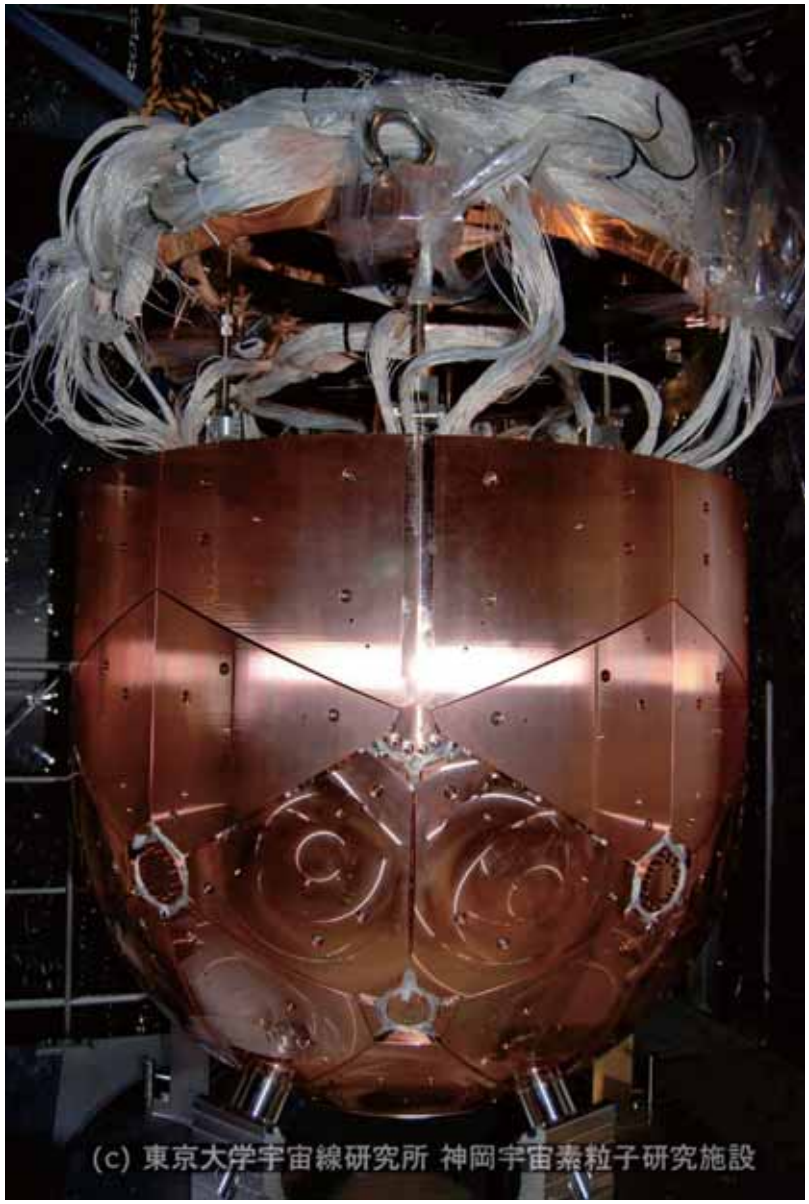


建設の状況

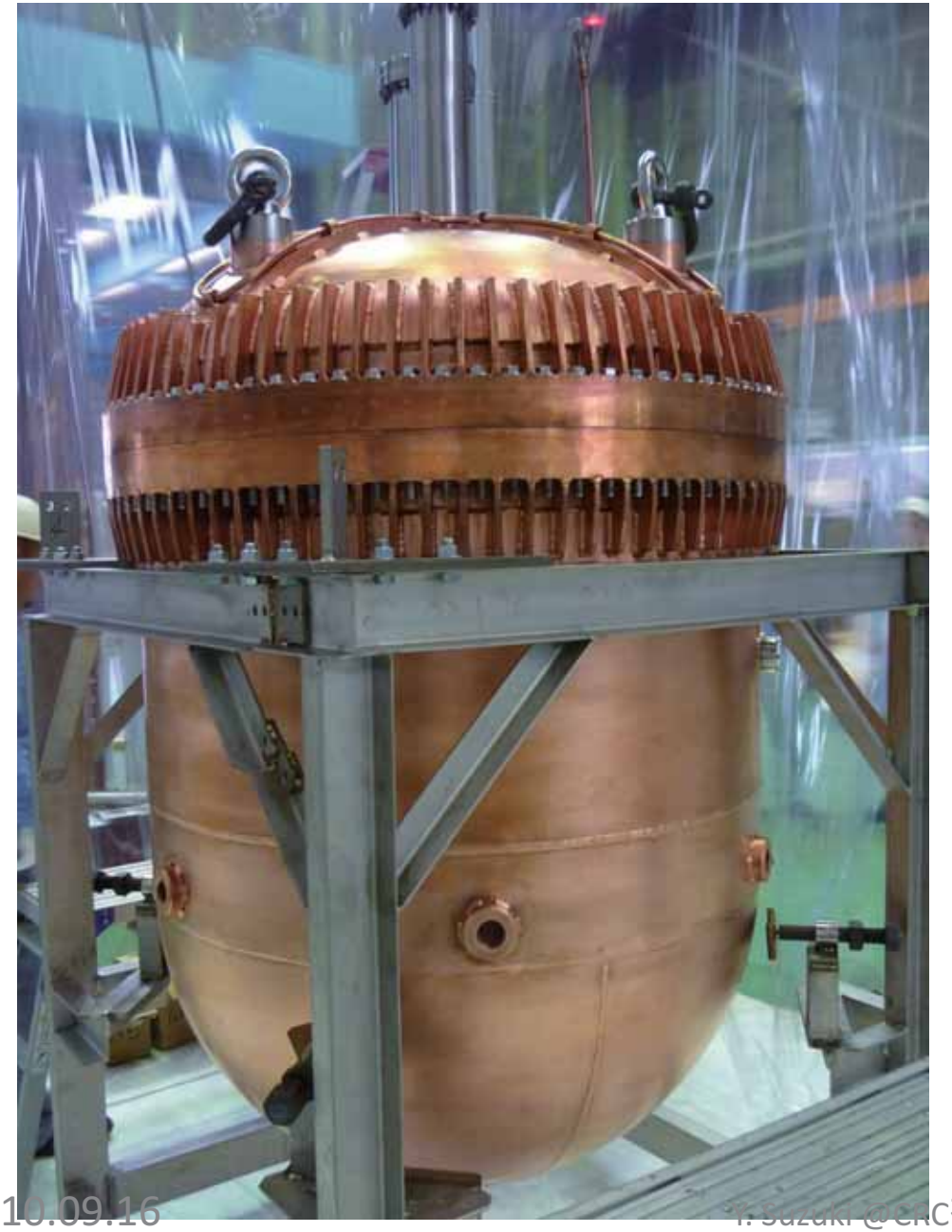
- 2009年2月
  - 水槽完成
- 2009年12月
  - PMTホルダー完成
- 2010年7月
  - 真空容器完成
    - 補強の増強等の設計変更により遅れ
  - 7月29日：神岡到着
- 2010年9月12日
  - 容器・配管設置完成
- 2010年9月14日
  - Xe　蒸留開始

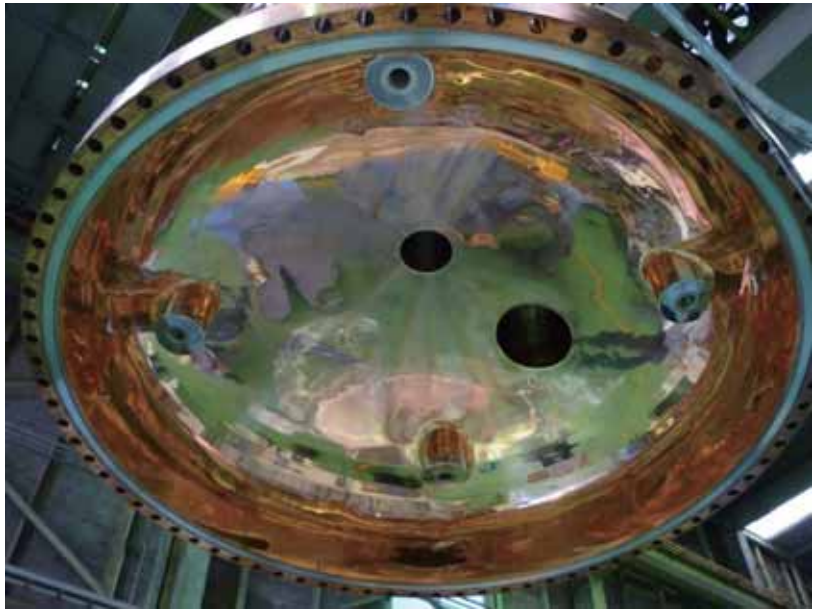
(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

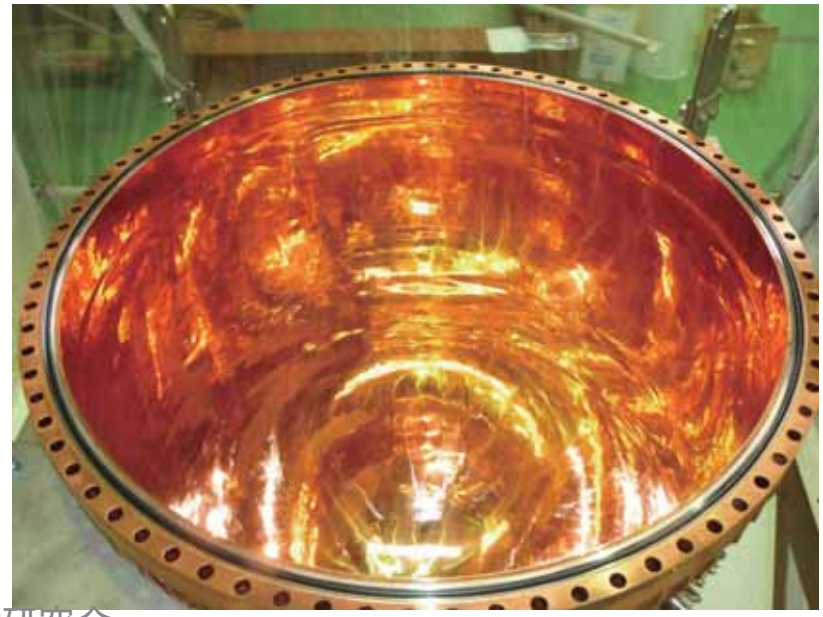
PMTホルダー



真空容器



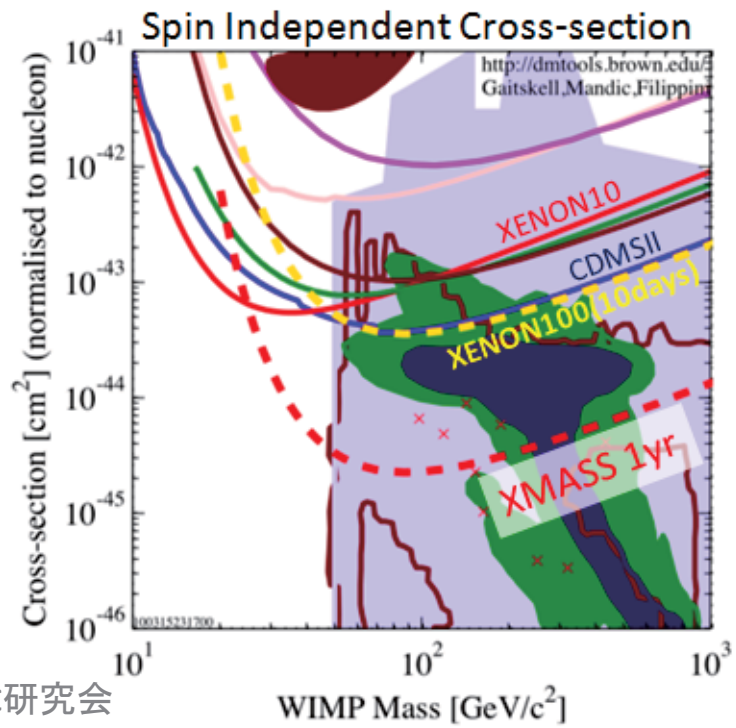




実験室の写真

XMASS-Iの現状のまとめ

- **建設の現状・今後**
  - ９月半ばに検出器全体が完成
  - １１月末頃まで　commissioning
  - 実験データーの収集・解析（今年末から来年度にかけて）
- **競争相手**
  - CDMSII
    - Super-CDMSは、来年以降
  - XENON100
    - １２月に、１００－２００日のデータを発表予定
- **Rnの低減**
  - ガスPhaseでは完成
  - 液体循環での除去
    - １０月ごろまでをめどに、別システムで併行して開発研究

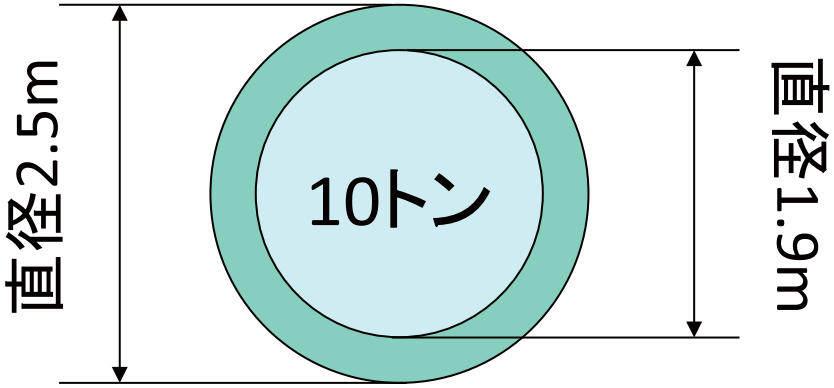


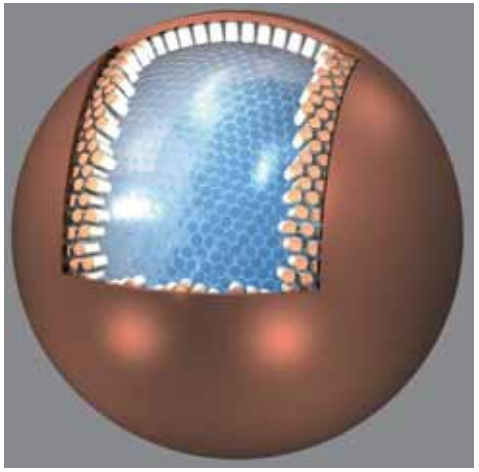
XMASS-II

- Multi-Purpose Detector (10 ton fiducial)
  - Dark Matter, pp-solar neutrinos, Neutrino-less double beta decay
  - Dark Matter: detailed study or search for ~10^{47}cm^2 region
  - pp-solar neutrinos: 6.5 events/day (>50keV)
    - ^{7}Be-neutrinos: 3.5 events/day
    - ⇔ Super-K: 13 events /day
  - Double Beta Decay: 860 kg of ^{136}Xe in the fiducial mass
    - Cover inverted mass hierarchy >20meV

XMASS-II

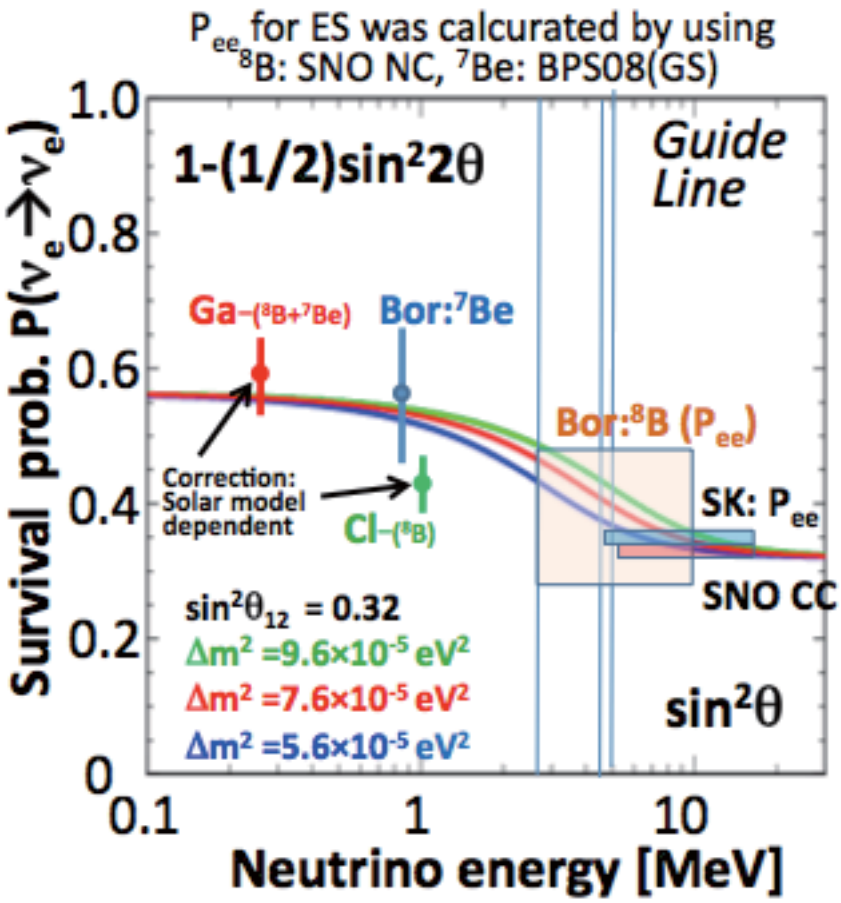
- 直径2.5m 25トンの液体キセノン（30cm自己遮蔽）
- 直径1.9m 10トンの液体キセノンが有効体積
- 直径16cm PMT 642本



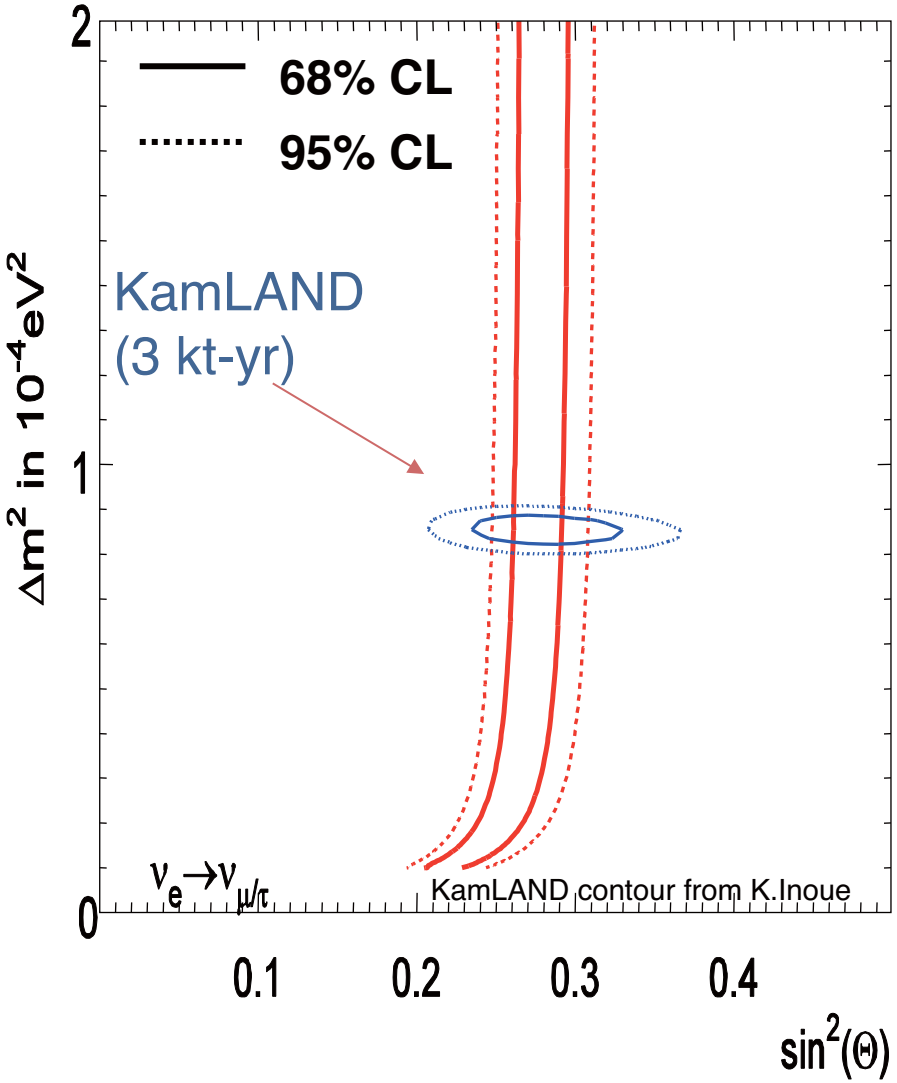


ppニュートリノ観測　(Bread and Butter)

- 太陽ニュートリノ振動の全貌の解明
- 振動パラメータ θ_{12}のpp-νによる決定（vacuum oscillation）
  - ppは予言精度が最も高い較正された線源
  - θ_{12} from SNO+SK (matter oscillation) との比較
- KamLANDとの比較
- 新physics (magnetic mom., sterile)？
- 太陽物理：核融合反応そのものの観測



低エネルギー太陽ニュートリノによる ニュートリノ振動のパラメータの決定精度

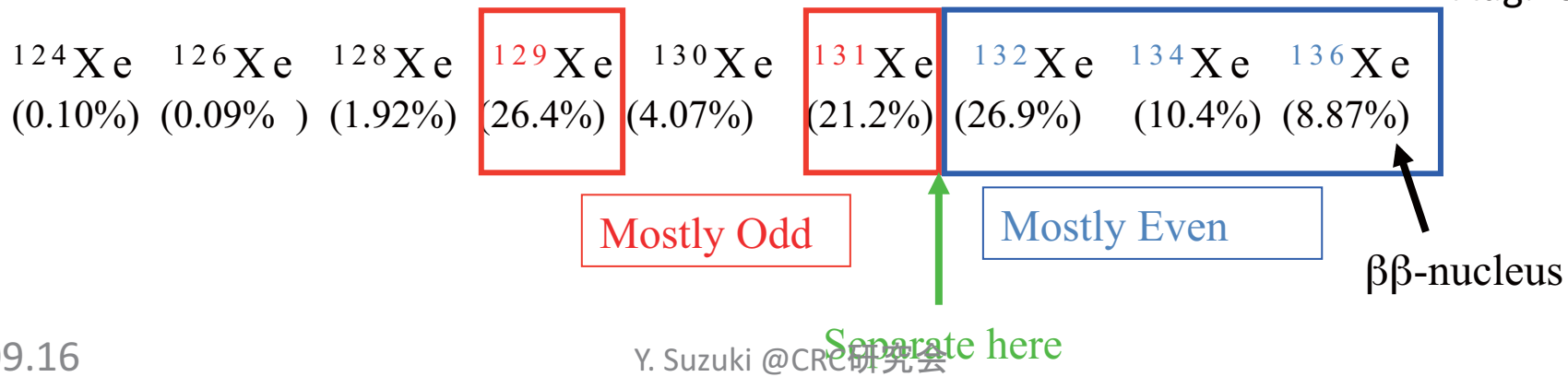


- **混合角の決定精度:**
  $\sin^2\theta = 0.28 \pm 0.015$ (stat.+SSM)
  - 現在の実験精度:
    $\sin^2\theta = 0.31 \pm 0.02$
    (ほぼ、SNO+SKで決定)

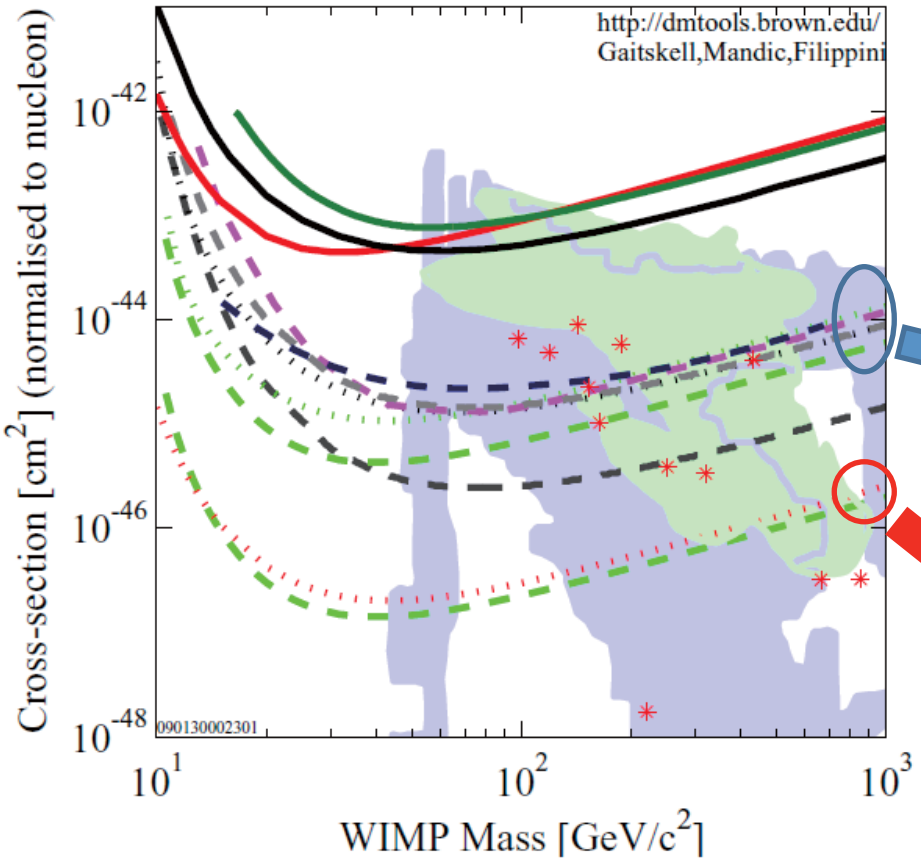
暗黒物質研究（Phase II）

- Phase Iで発見（兆候）があれば
  - 高統計で確認（x100）、10^{-46}cm^{2}で、1年500事象
  - pp-νがバックグラウンド: DMの信号領域で、年間40事象
  - 季節変動の観測が可能
  - 同位体分離（奇核、偶核での測定）
- Phase Iで兆候がなかったとき
  - 10^{-47}cm^{2}までの探索

Y. Suzuki
Aug. '00



暗黒物質探索の感度（800kg, 10トン）



~100 kg fid. mass detectors
aiming ~10^{-45} cm^2
a few $M ~ $10M

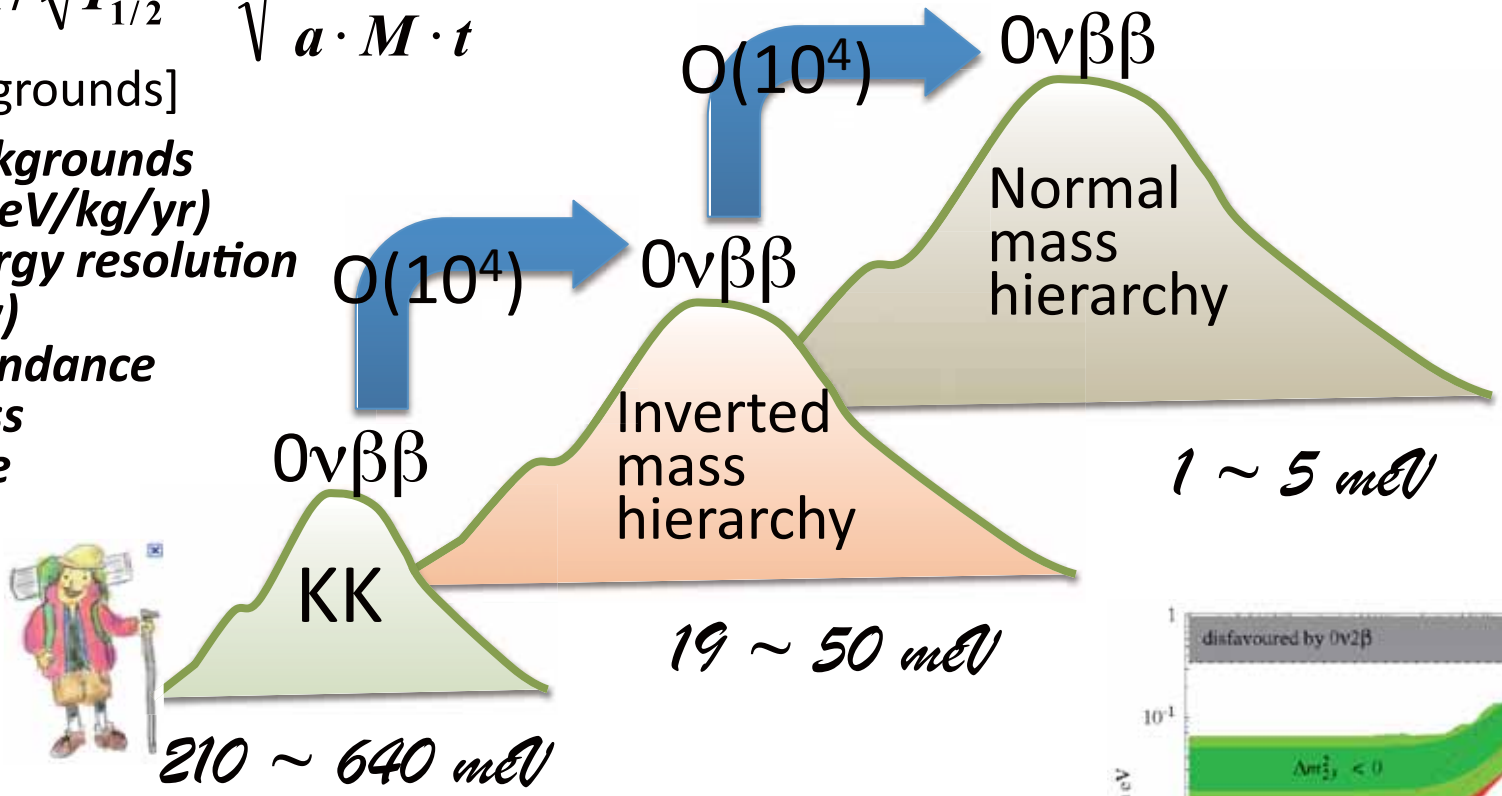
> 1 ton fid. mass detectors
aiming ~10^{-47} cm^2
$10M ~ $100M<

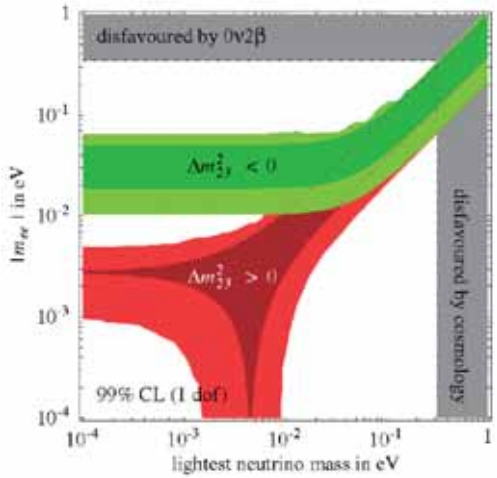
0ν2重ベーター崩壊

$$< m_\nu > \sim 1/\sqrt{T_{1/2}^{0\nu}} \sim \sqrt[4]{\frac{BG \cdot \Delta E}{a \cdot M \cdot t}}$$

[with backgrounds]

BG: ***backgrounds (c/keV/kg/yr)***
ΔE: ***energy resolution (kev)***
a: ***abundance***
M: ***mass***
t: ***time***

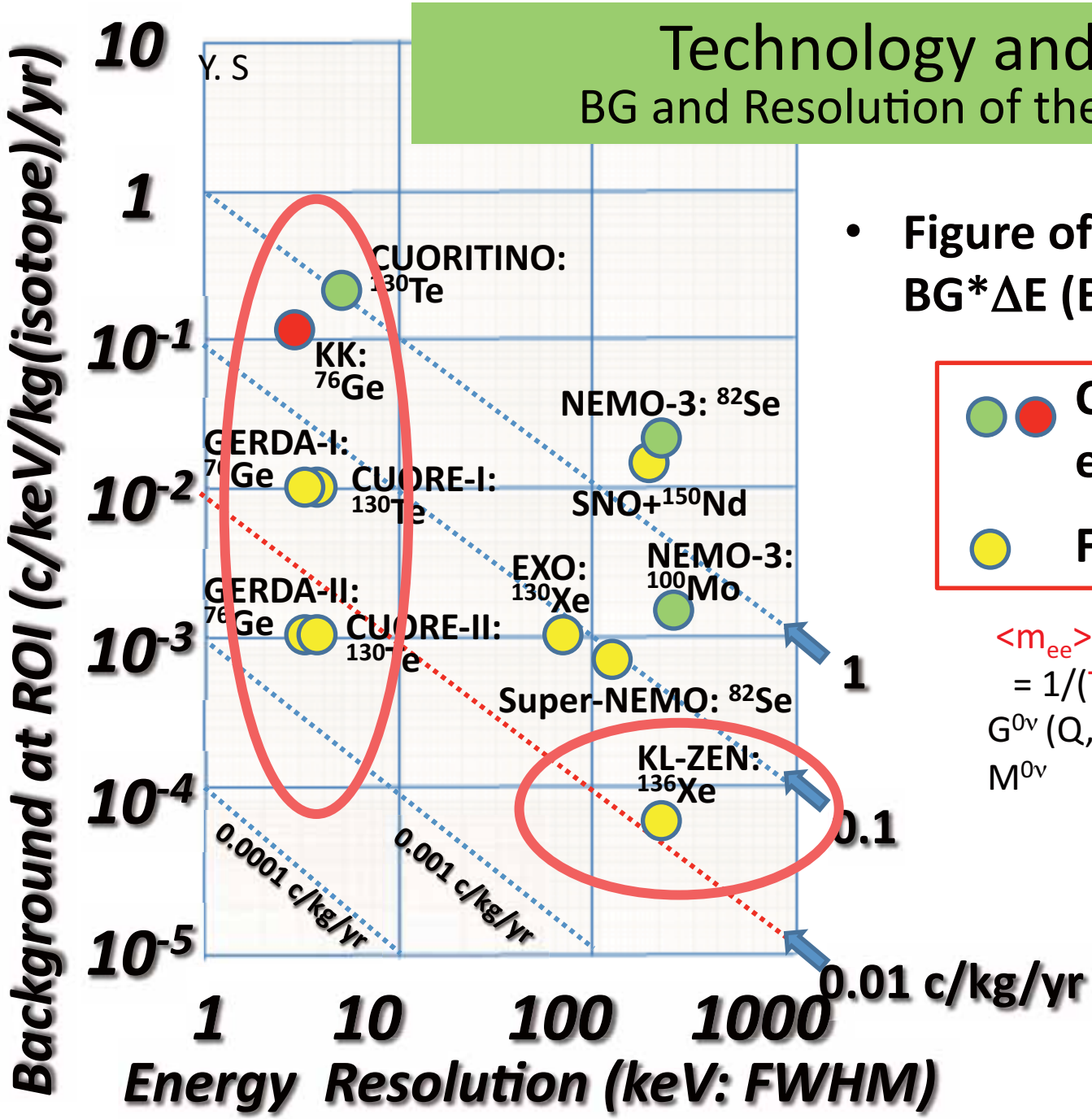




A. Strumia, F. Vissani
Nucl. Phys. B726(2005)294

Technology and Efforts

BG and Resolution of the experiments



- **Figure of Merit:**
  BG*ΔE (BG rate in the ROI)

Current/Completed experiments

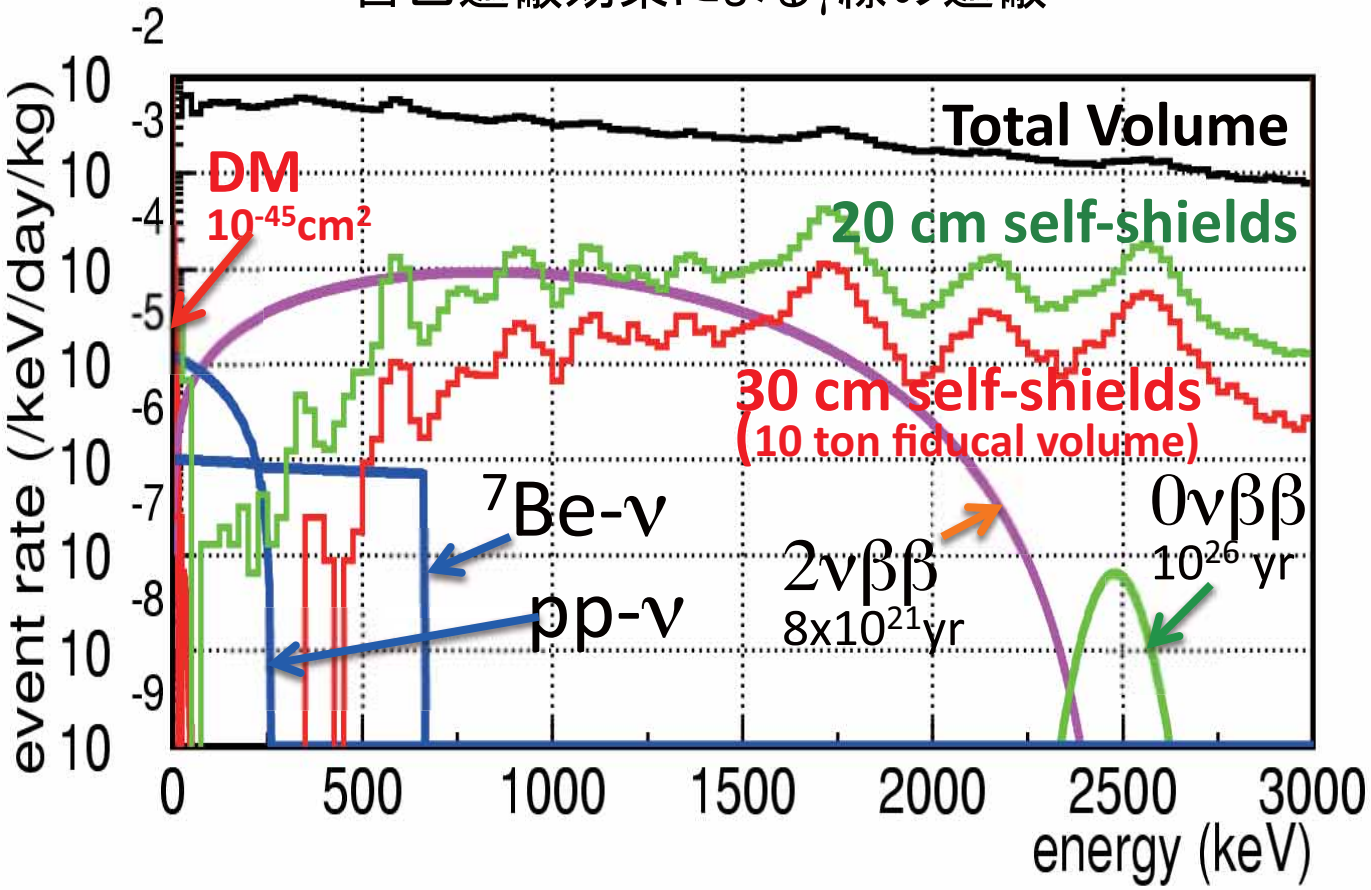
Future experiments

$\langle m_{ee} \rangle^2$
$= 1/(T_{1/2}^{0\nu} * G^{0\nu}(Q, Z) * |M^{0\nu}|^2)$
$G^{0\nu}(Q, Z)$: phase space integral
$M^{0\nu}$: matrix element

XMASS-II
Res(FWHM)~50keV
➔O(10^{-4} /keV/kg/yr)
➔O(3×10^{-7}/keV/kg/day)
For IMH.

10トン検出器のバックグラウンド（外部由来γ）

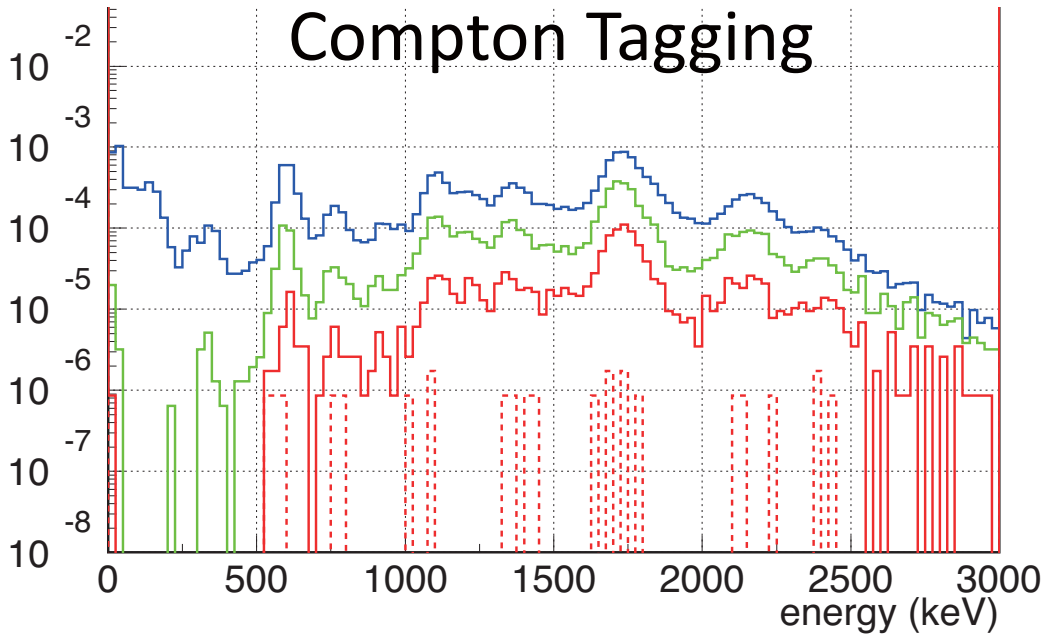
自己遮蔽効果によるγ線の遮蔽



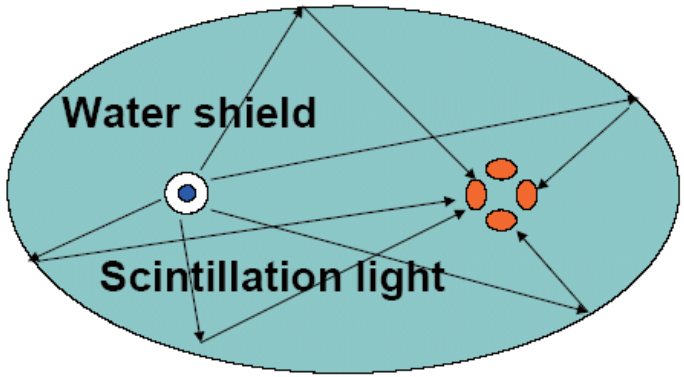
0-500keVの領域では外来γ線からはバックグラウンドフリー

- 低Eenergy側： 内部BG (Kr~0.1 ppt, U, Th~10^{-16}g/g)で決まる。
  KamLAND, Borexinoより緩い。
  5年でppを10000事象以上得る➔ 10トンの有効体積
- 高Energy側： センサのBGが残る。

Background reduction for ββ decay



New Concepts
Example



内部由来バックグラウンドに対する見通し

内部バックグラウンドの要請

U/Th:	**< 1×10^{-16}g/g for U,Th/Xe**
^{39}Ar (0.57MeV β), ^{42}Ar (0.6MeV β)	**< 1×10^{-9}g/g for Ar/Xe**
^{85}Kr (0.687MeV β)	**< 4×10^{-15}g/g for Kr/Xe**

- U/Thのラドンに関しては、800kg検出器におけるBi-Poの解析により確認したい。(10^{-16}g/g~0.1ev/day/1ton) 除去方法も検討中
- Arに関しては、要求度がそれほど高くない（今後測定の予定）
- Krに関しては、あと二桁の改善で到達可能。蒸留による良い見通しがある。ただしガス分析測定の感度上昇が必要。
- 中性子バックグラウンド（熱中性子照射）

Phase I.5

- 5 ton detector
- 有効質量　1トン、
- ダークマターの次のステップ、、$10^{-46}cm^2$
- すでに、キセノン2トンを保有

まとめ(XMASS II)

- XMASS-IIは、有効質量１０トンの液体キセノン検出器
- 外部ガンマ線バックグラウンドに関しては非常に見通しが得られている。
- 内部バックグランドは、Phase-Iからの結果待。
- pp-太陽ニュートリノ観測はXMASS-IIのBread and Butterである。
- 暗黒物質研究を飛躍的に進展させる。
- ２重ベータ崩壊は、更なる検討が必要である。
- Phase I.5は、すぐにでも建設可能である。