

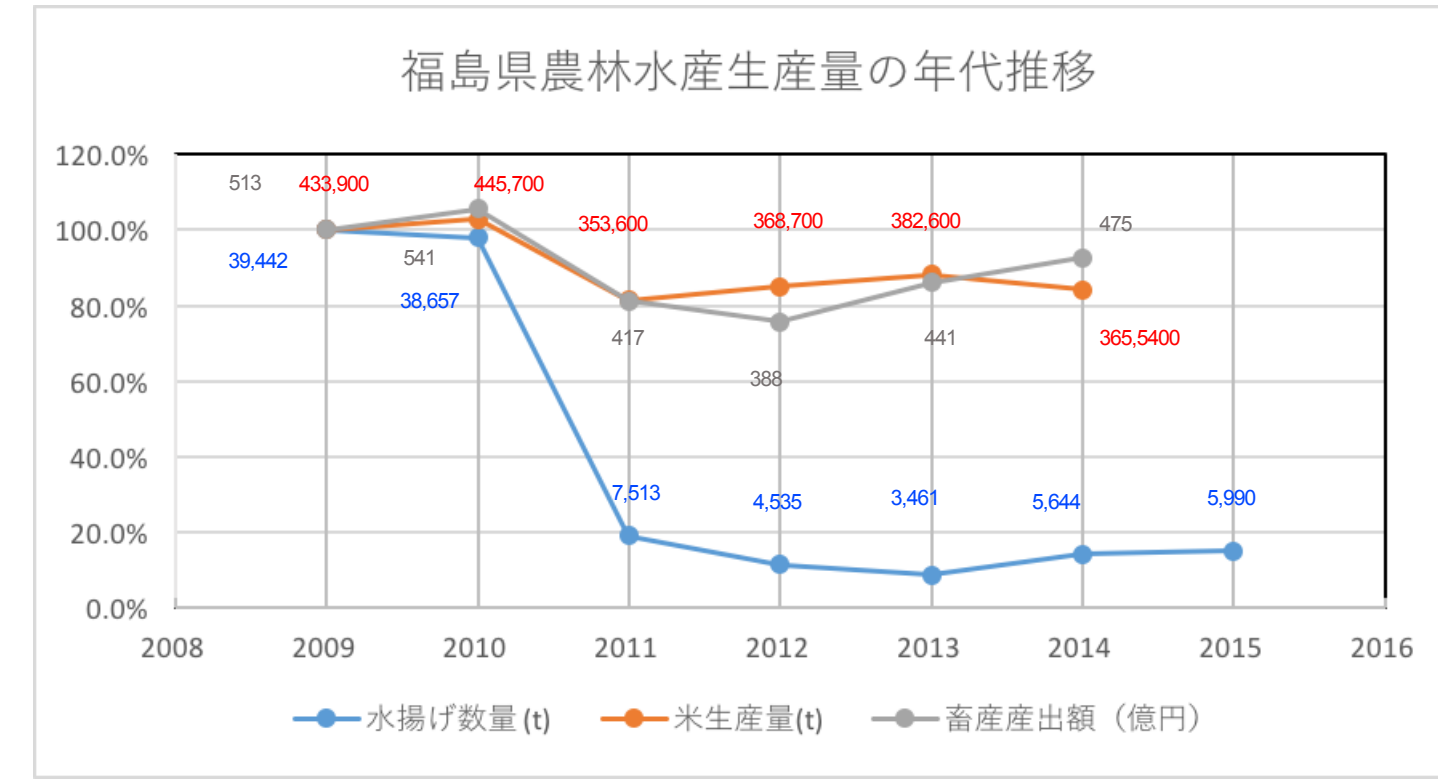
リアルタイムストロンチウム90カウンター

伊藤博士・兼子菜緒見・河合秀幸・小林篤志・児玉 諭士・水野貴裕・田端誠(千葉大学理学研究科)



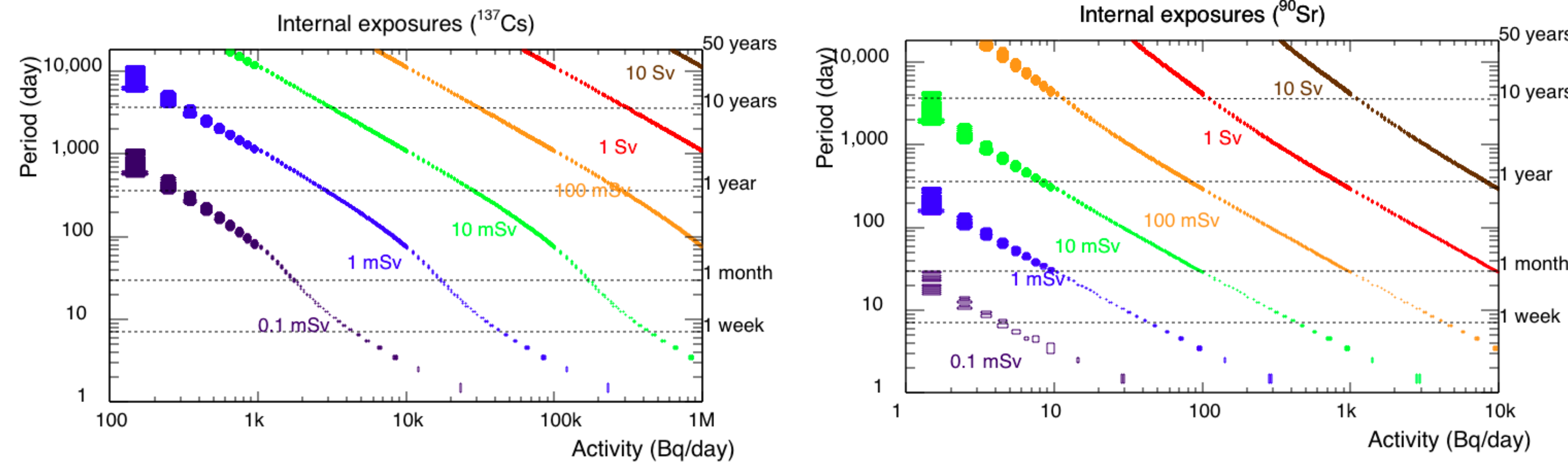
背景

福島第1原発事故の影響によって福島県漁業が壊滅的な損害を受けました。2011年からの農林水産の生産量年代推移では事故発生年度に米、畜産も被害を受けたものの回復傾向にある。しかし、魚業は未だに最盛期の生産量へ回復できていません。



福島県沖漁業が震災以降未だに再開されていない一つの理由はストロンチウム90(以降⁹⁰Sr)であると考えられています。放射性セシウムは試験的に監視し検体ごとに測定され、厚生労働省が規定した100 Bq/kgを上回る海産物は2015年度は4917検体中1検体確認されたと報告されました。一方⁹⁰Srは検体平均の結果からヒラメ、カレイ、スズキからCsとの比で1/30程度観測されました。

生涯被曝線量を評価すると¹³⁷Csを100Bq/kgを毎日摂取したとしても自然放射能である⁴⁰Kによる被曝線量である10mSvを十分に下回っています。一方、⁹⁰Srで同様に摂取すると1年で最大100mSv内部被曝すると推定されました(下図)。



問題点・課題点

- ⁹⁰Srはアルカリ土類金属なので骨に蓄積する性質を持ちます。
- 食物連鎖を経て高濃度の⁹⁰Srを摂取する可能性があります。
- ¹³⁷Csや¹³⁴Csと比較して放射能あたりの生涯被曝線量は1,000倍以上多い
- ⁹⁰Srを検体ごとに短時間で放射能を測定する必要があります。
- しかし⁹⁰Srと娘核の⁹⁰Yはγ線を放出しないため放射線測定が困難です。

研究課題の概要

我々はストロンチウム90に高い感度をもつ検出器「リアルタイムストロンチウム90カウンター」を開発しました。チェレンコフ光検出を応用することで娘核の⁹⁰Yから放出される最大2.28 MeVのβ線を計測し、放射能を測定します。

バックグラウンドとなる核種は¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs, そして⁴⁰Kです。いずれもγ線とβ線を放出しますが、⁹⁰Yからのβ線だけがチェレンコフ放射条件を満たすような屈折率を持つ物質の一つシリカエアロゲルを使用しました。

波長変換ファイバーを用いて面積拡張とγ線雑音を抑制し、宇宙線除去装置で自然放射能の雑音を抑制しました。密封線源を用いた試作機の性能評価測定で海水の場合検出限界は1 Bq/kg未満、海産物の場合は25 Bq/kgが推定されました。実用化を目指して有効面積300×100mm²のデモ機を展示します。

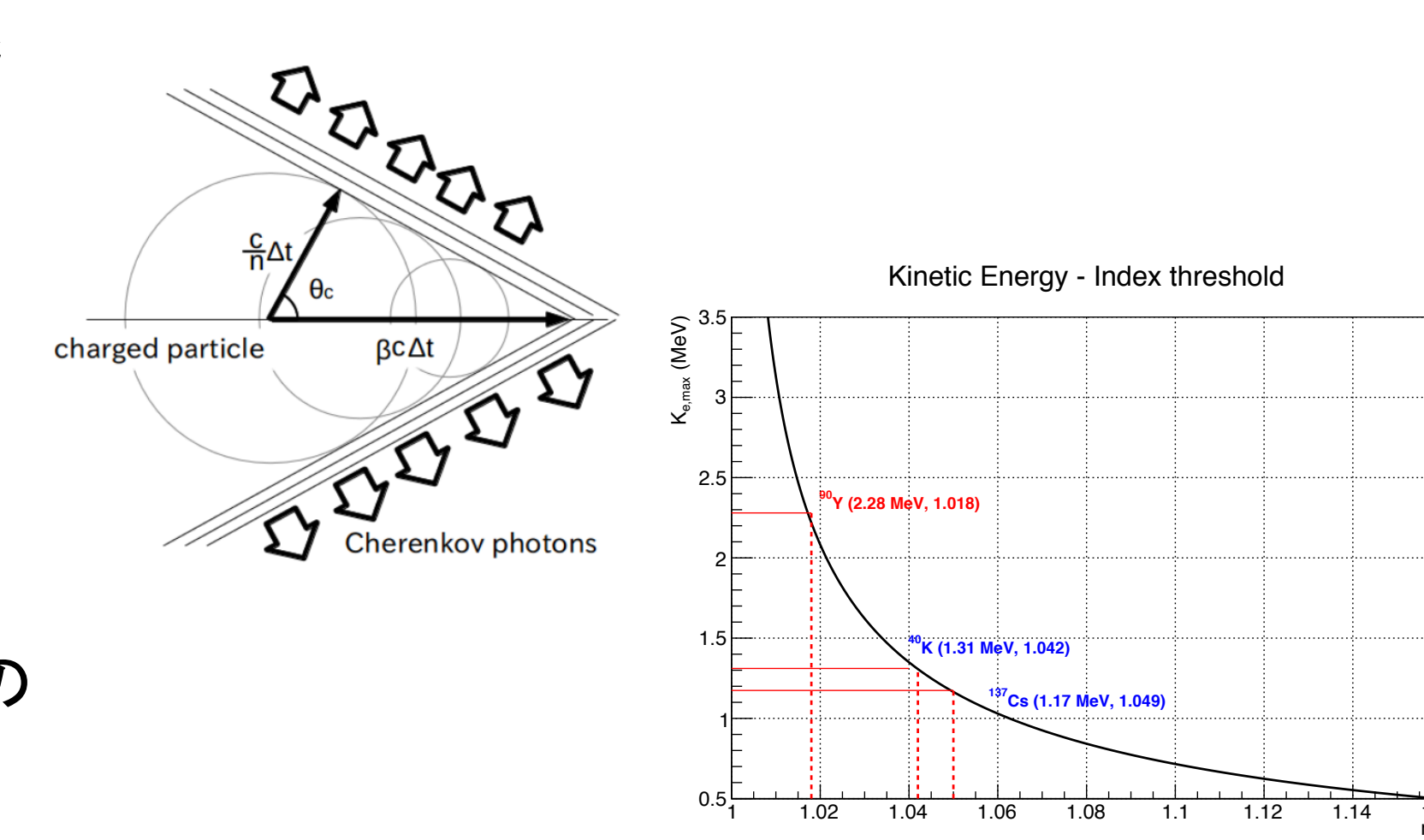
原理

屈折率nの物質中を荷電粒子の速度vが光速cを上回った時(v>c/n)光が放射される現象をチェレンコフ放射と言います。またその時の光をチェレンコフ光と言います。

β線(電子)の運動エネルギーKと速度比β=v/cは以下で表せます。

$$\beta = \frac{\sqrt{(m_e c^2 + K) - m_e^2 c^4}}{m_e c^2 + K}$$

⁴⁰Kからのβ線でチェレンコフ放射せず、⁹⁰Yからのβ線が放射する屈折率は1.018~1.042です。



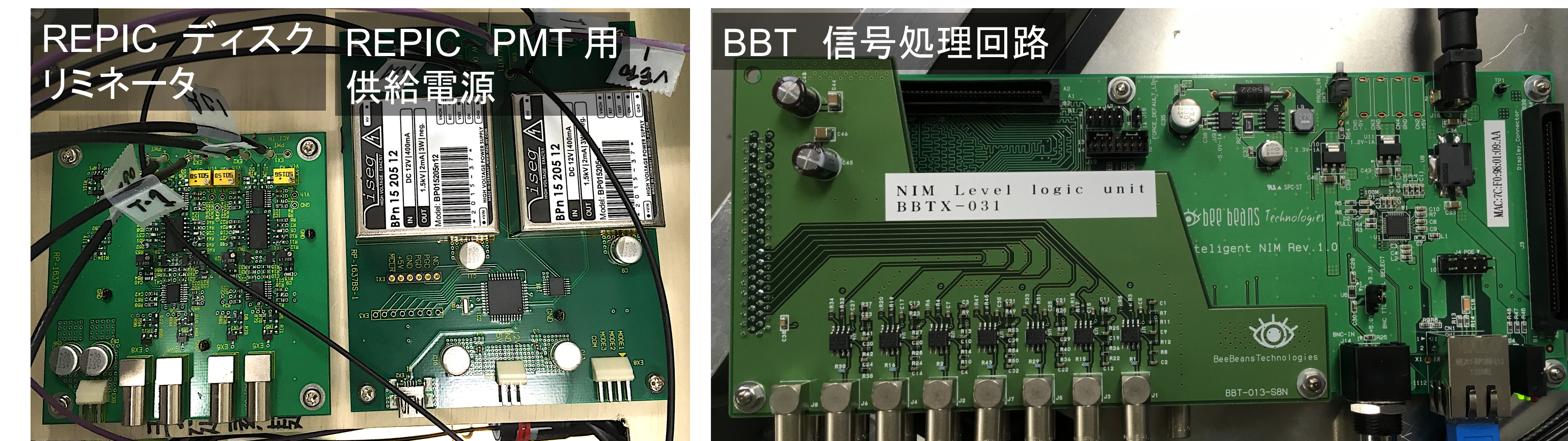
最近のノーベル物理学賞受賞者の研究テーマの共通点はチェレンコフ光:2015年、梶田さん(スーパーカミオカンデ:水チェレンコフ)。2008年小林・益川さん(KEK Belle実験シリカエアロゲルチェレンコフ)。2002年、小柴さん(カミオカンデ:水チェレンコフ)。

⁹⁰Srは半減期28.8年で最大0.54 MeVのβ線を放出し⁹⁰Yに崩壊します。娘核の⁹⁰Yは半減期64時間で最大2.28 MeVのβ線を放出し⁹⁰Zrに崩壊します。親核より娘核の方が半減期が短いため次第に放射平衡状態になり2つの核種の放射能が等しくなります。したがって⁹⁰Yの放射能を測定することで⁹⁰Srの放射能が推定できます。

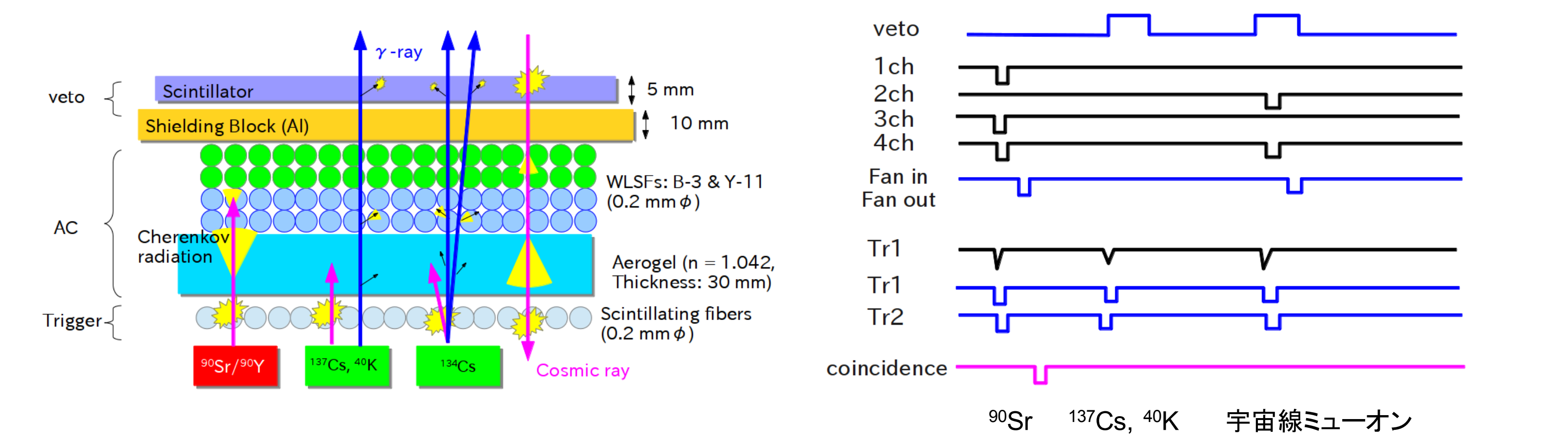
材料



- シリカエアロゲル
- 波長変換ファイバー
- シンチレーションファイバー
- プラスチックシンチレータ
- 光電子増倍管
- 供給電源
- 信号処・読み出し回路



結果



放射能23.8 kBqの⁹⁰Sr密封線源、26.0 kBqの¹³⁷Cs密封線源、62 Bqの⁴⁰K線源を用いて性能評価しました。1時間のバックグラウンド測定では10回試行して190±14カウント計測しました。核種に置いても同様に計測しました。

$$N_{Sr} = 191752 \pm 1691$$

$$N_{Cs} = 309 \pm 16$$

$$N_K = 191 \pm 31$$

Table I. The absolute efficiencies

parameter	value/ Bq ⁻¹ s ⁻¹
η_{Sr}	$(2.24 \pm 0.02 \text{ (stat)}_{-0.38}^{+0.56} \text{ (sys)}) \times 10^{-3}$
η_{Cs}	$(1.27 \pm 0.23 \text{ (stat)}_{-0.22}^{+0.32} \text{ (sys)}) \times 10^{-6}$
η_K	$< 1.6 \times 10^{-4}$

測定結果と線源放射能から装置感度ηは以下の式で評価しました。

$$\eta_{Sr} \equiv \frac{N_{Sr} - N_{BG}}{A_{Sr} T}$$

試料は事前に熱圧縮して厚さ1 mmにします。圧縮率は海水の場合0.01、海産物の場合0.3と仮定します。有効面積300×100mm²なので圧縮後の試料の最大質量はm=30gです。この時バックグラウンドと比べて統計的に有意に⁹⁰Srを検出できる限界は以下で評価しました。

$$A_{Sr}^{min} = \frac{3 \sqrt{N_{BG} + (\eta_{Cs} A'_{Cs} + \eta_K A'_K) m \epsilon^{-1} T}}{\eta_{Sr} m \epsilon^{-1} T}$$

ここでA'_{Cs}は基準値の100 Bq/kg, A'_Kは海産物の場合150 Bq/kg, 海水の場合12.1 Bq/kgとします。

結果: 検出限界(海水) 1.8 Bq/kg
(海産物) 53 Bq/kg

まとめ

福島県漁業再開のためには⁹⁰Srを検体単位で測定する必要があります。⁹⁰Srは¹³⁷Csよりも内部被曝のリスクは高く、測定が困難です。

リアルタイムストロンチウム90カウンターはチェレンコフ光検出を応用した装置で⁹⁰Sr(⁹⁰Y)だけに高い感度をもつ計測器です。そのため、⁹⁰Srの放射能を測定することができます。試作機の性能試験の結果、検出限界は海水の場合1.8 Bq/kgを達成し、海産物の場合53 Bq/kgを達成しました。

実用化を目指して製造・開発をしています。実用機は有効面積を500×200mm²にすることで検出限界は1/√3に比例して向上し海水で1Bq/kg未満、海産物で25Bq/kgが推定されました。実機を用いて実際に海産物の検体を検査する予定です。

参考文献

[1] Agriculture, Forestry and Fisheries Department of Fukushima Prefecture, reports and statistical data Available: <http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/36035e/suisanka-top.html>.
 [2] J. Tsuboi et al., Journal of Environmental Radioactivity 141 (2015) 32-37.
 [3] S. Yamasaki et al., Science of the Total Environment 551-552 (2016) 155-162.
 [4] Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Analysis method of radioactive strontium (2003), Available: <http://www.kankyo-hoshano.go.jp/series/lib/No2.pdf>.
 [5] H. Ito et al., Proceedings of Science, PoS(TIPP2014) 242.
 [6] M. Tabata and H. Kawai, JPS Conference Proceedings 8 (2015) 022004.
 [7] R. Pestotnik et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 595 (2008) 278-280.