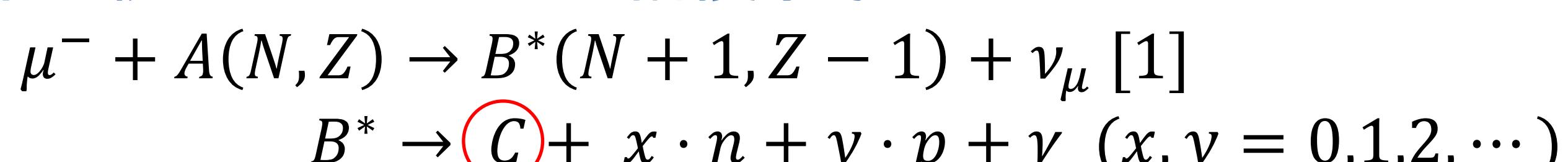


1. 本研究の目的

原子核によるミューオン捕獲事象



原子核ミューオン捕獲は不安定な放射性同位体を生成し、スーパー・カミオカンデ(SK)では太陽ニュートリノ観測のバックグラウンド事象となる。

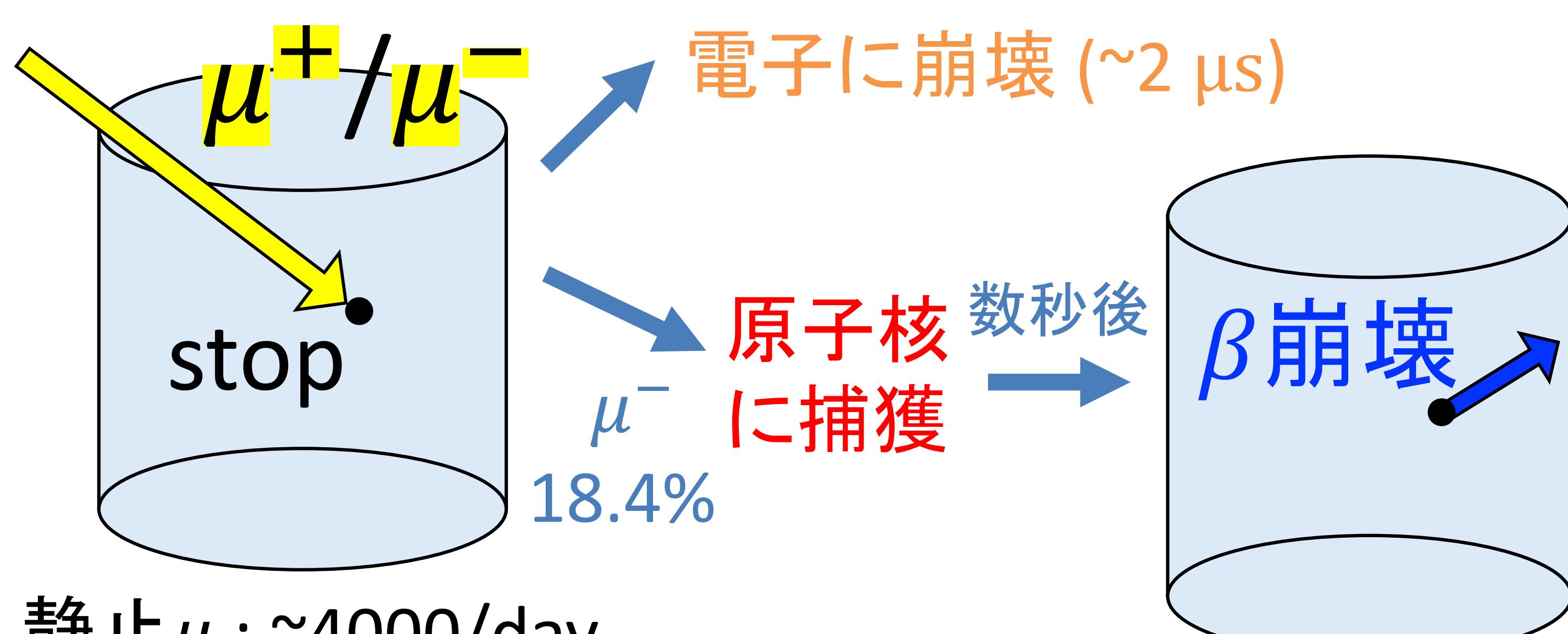
→ SKでミューオン核反応の研究が可能

ミューオン捕獲で生成される同位体				
Isotope	Reaction	Q-value [MeV]	Half-life [s]	
¹⁶ N	¹⁶ O(μ^- , ν) ¹⁶ N	10.42	7.13	
¹⁵ C	¹⁶ O(μ^- , νp) ¹⁵ C	9.77	2.45	
¹³ B	¹⁶ O(μ^- , $\nu n 2p$) ¹³ B	13.44	0.0172	
¹² B	¹⁶ O(μ^- , $\nu \alpha$) ¹² B	13.37	0.0202	

本研究は、¹⁶N, ¹⁵C および ¹²B の生成率および分岐比の世界最高精度の測定を実施した。

また、ミューオン原子核捕獲による β 崩壊は検出器内で一様・等方的に起こるため、分岐比の理解により、将来実験の新たなエネルギー校正手段としての活用が期待される (ex.) ハイ・パ・カミオカンデ

2. SKにおけるミューオン捕獲事象の検出

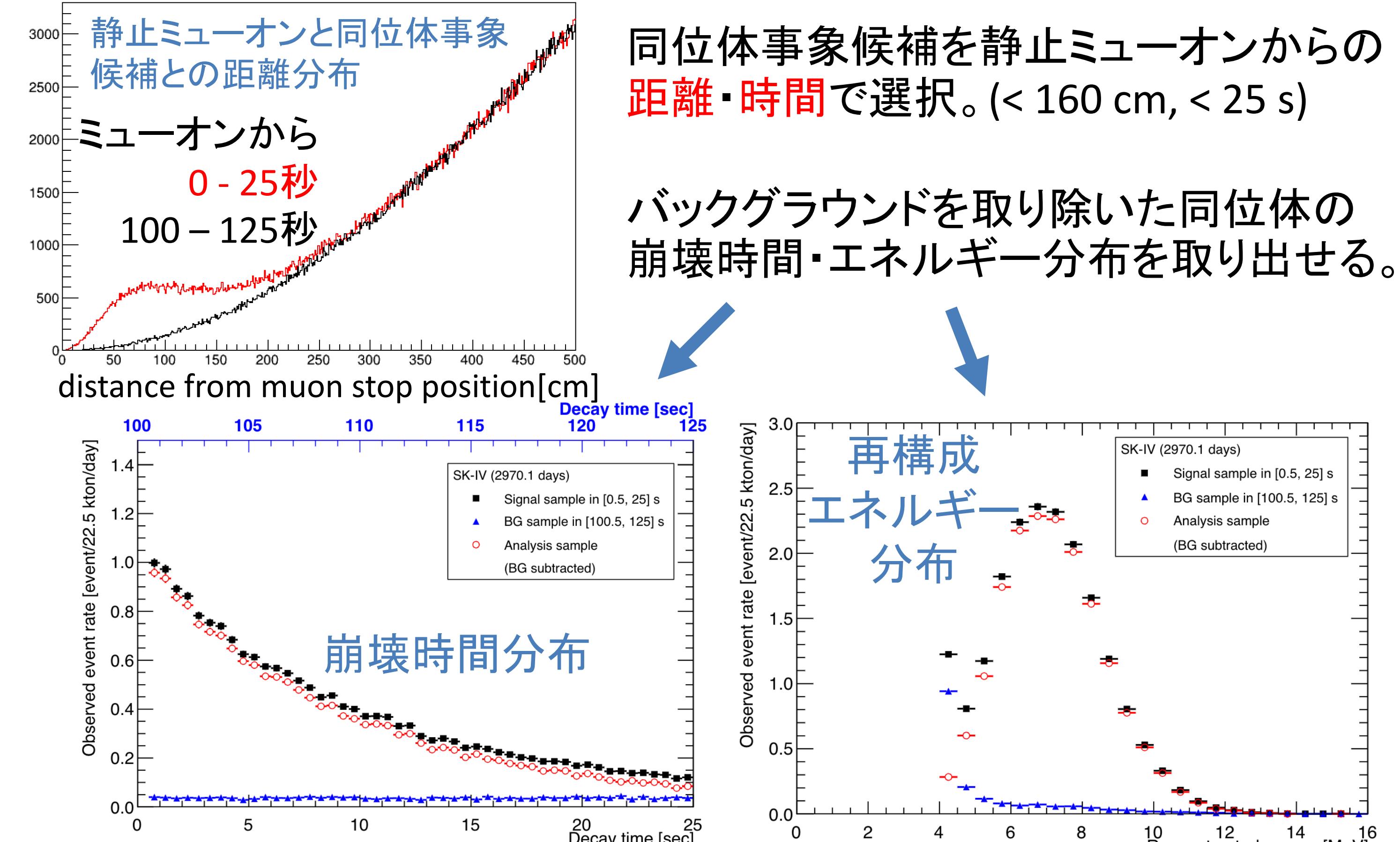


SKに宇宙線ミューオンが飛来
一部ミューオンはSK内部で静止する

静止した負ミューオンの18%は
酸素原子核に捕獲され、不安定な放射性同位体を生成する

静止ミューオンと β 崩壊事象のペアを探索することで、
酸素原子核捕獲による放射性同位体の測定ができる

3. 放射性同位体事象の選択



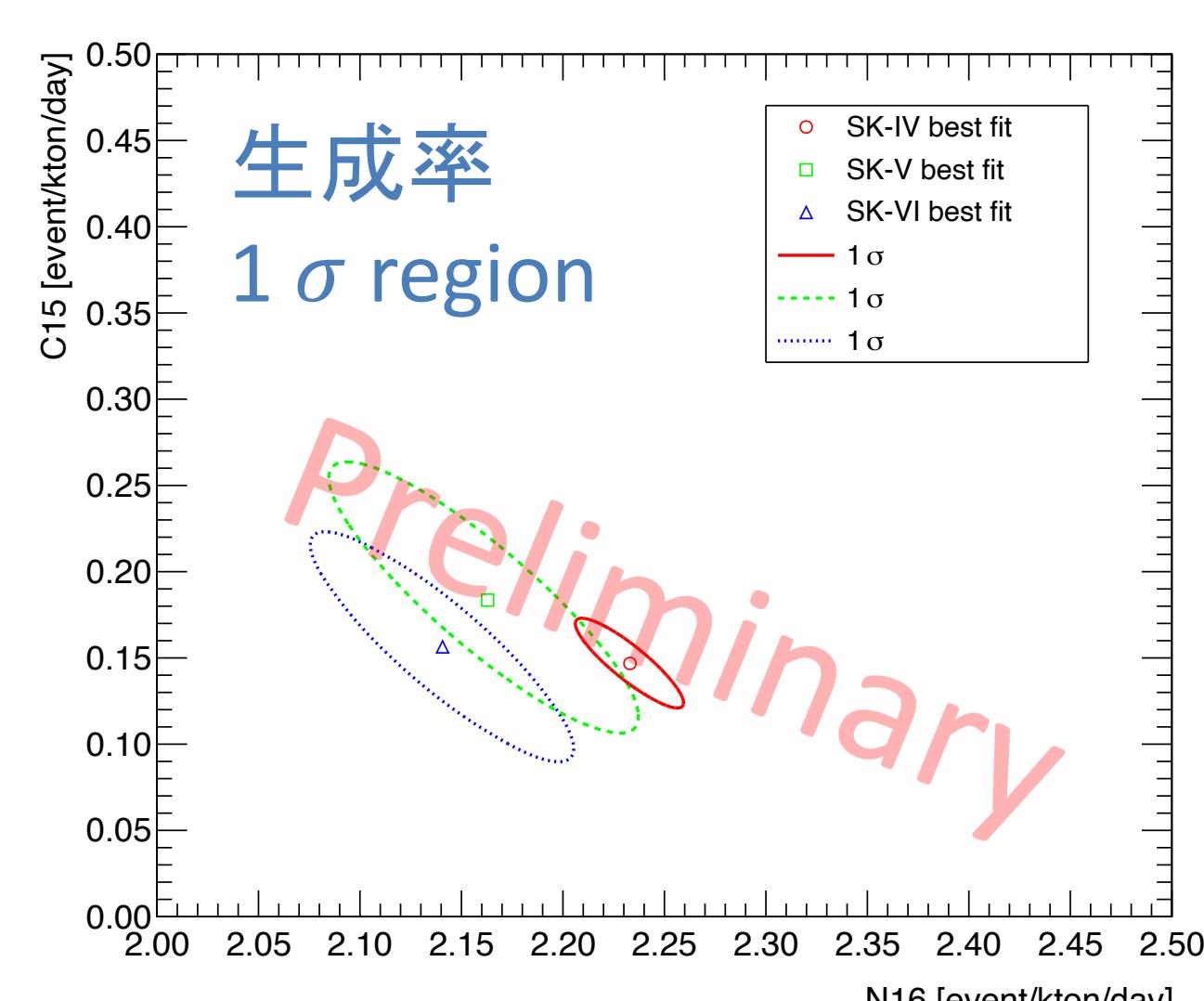
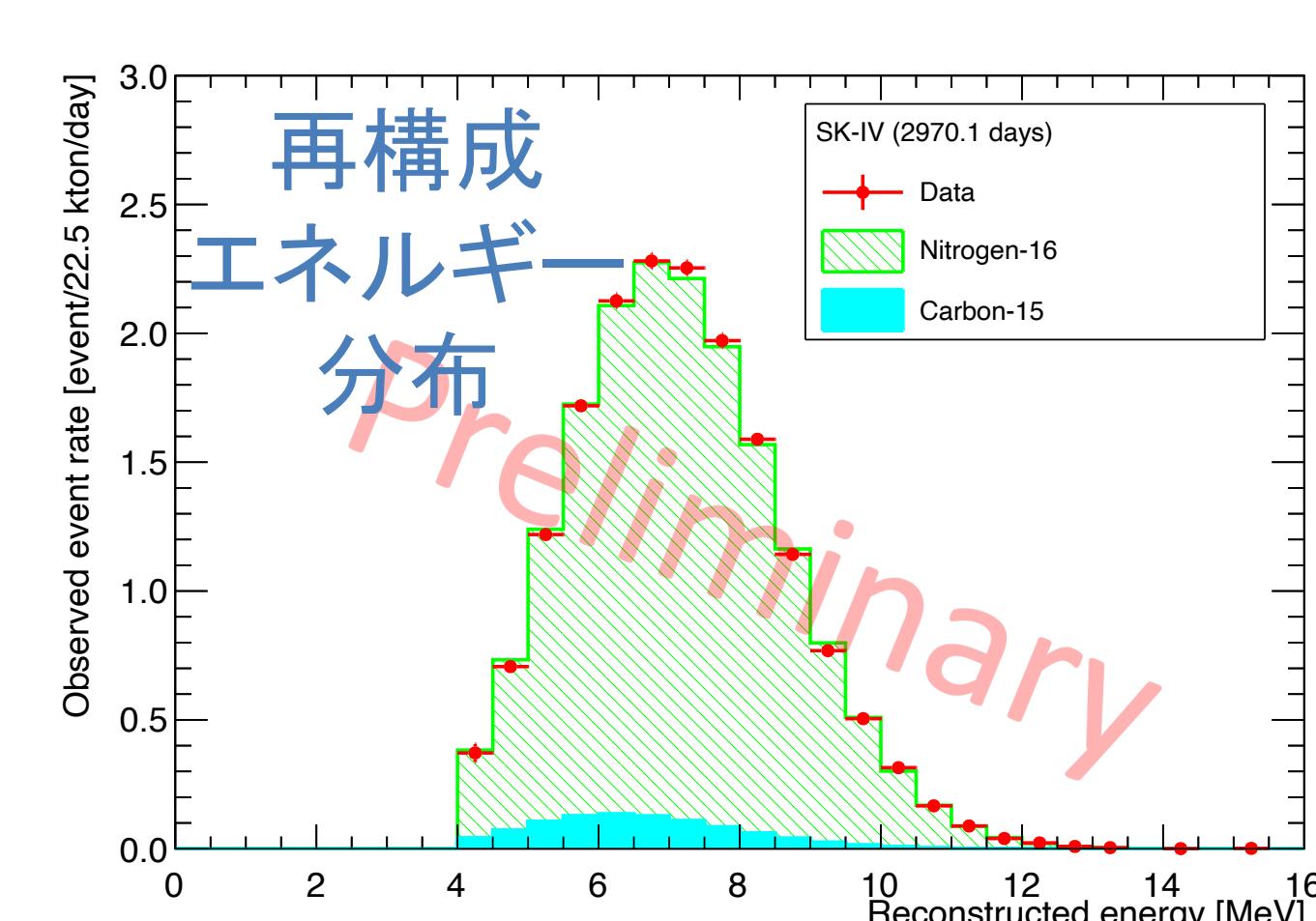
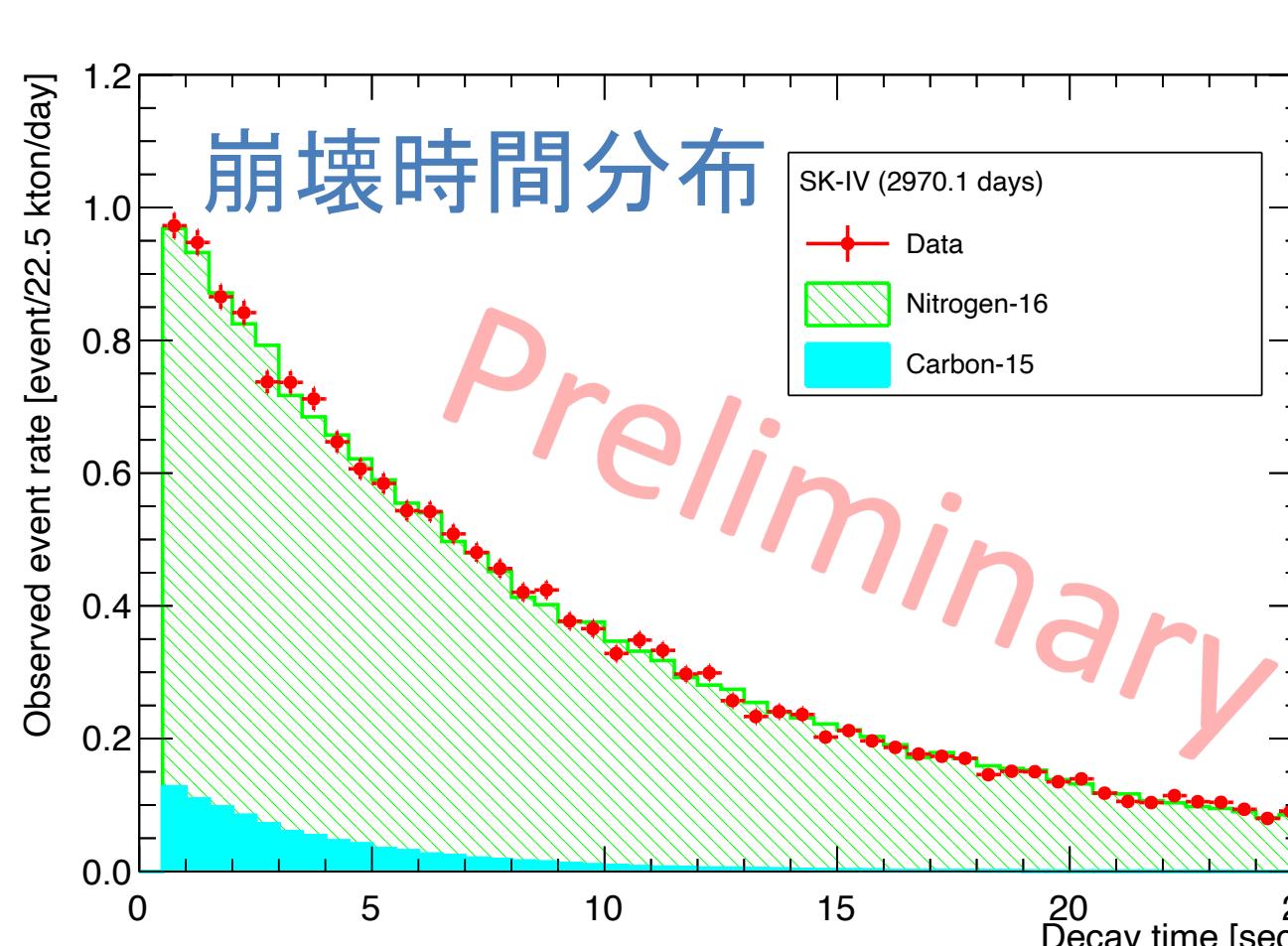
4. ¹⁶N, ¹⁵Cの生成率・分岐比測定

χ^2 を用いて生成率を測定

$$\chi^2_{\text{Total}} (R_{16\text{N}}, R_{15\text{C}}) = \chi^2_{\text{Time}} + \chi^2_{\text{Energy}}$$

$$\begin{cases} \chi^2_{\text{Time}} = \sum_i^{n_{\text{Time}}} \frac{(N_i^{\text{Data}} - N_i^{\text{MC}})^2}{(\sigma_i^{\text{Data}})^2 + (\sigma_i^{\text{MC}})^2 + (\sigma_i^{\text{Syst.}})^2} \\ \chi^2_{\text{Energy}} = \sum_i^{n_{\text{Energy}}} \frac{(N_i^{\text{Data}} - N_i^{\text{MC}})^2}{(\sigma_i^{\text{Data}})^2 + (\sigma_i^{\text{MC}})^2} + \left(\frac{1-p}{\sigma_i^{\text{E-scale}}} \right)^2 \end{cases}$$

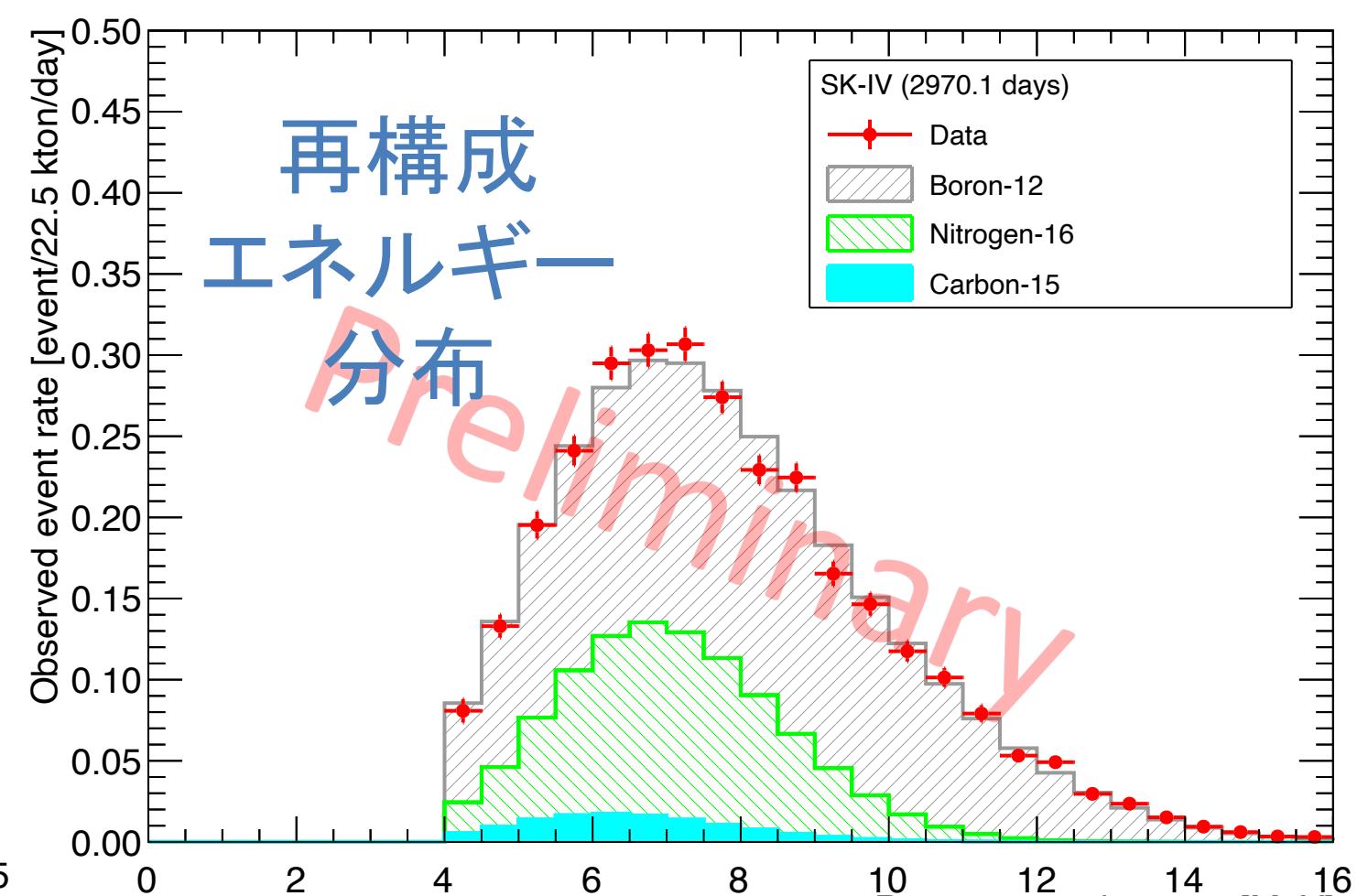
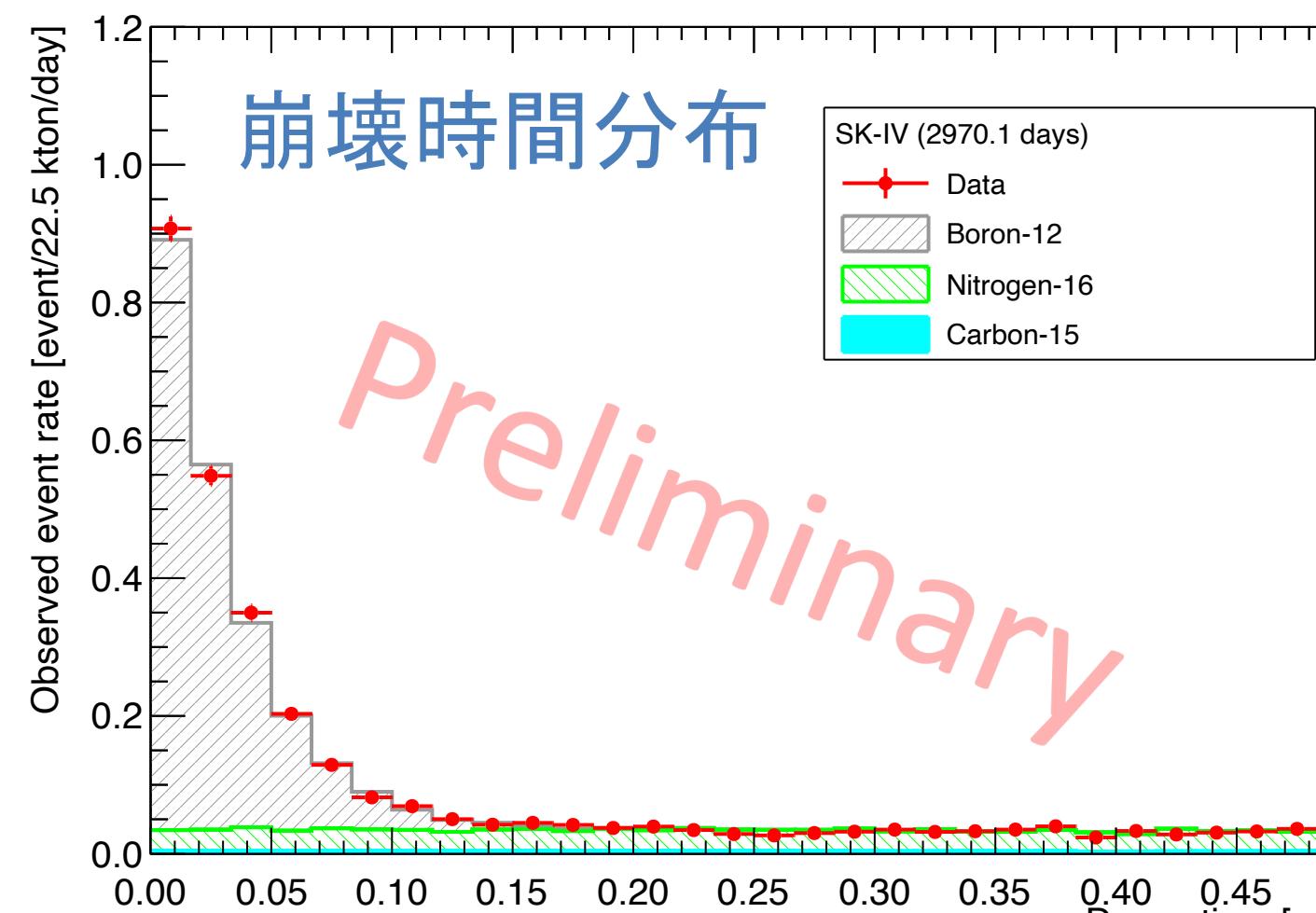
- ・ミューオンの選択効率
- ・ミューオン電荷比[2]
- ・放射性同位体選択効率を考慮して同位体の生成率・分岐比を計算



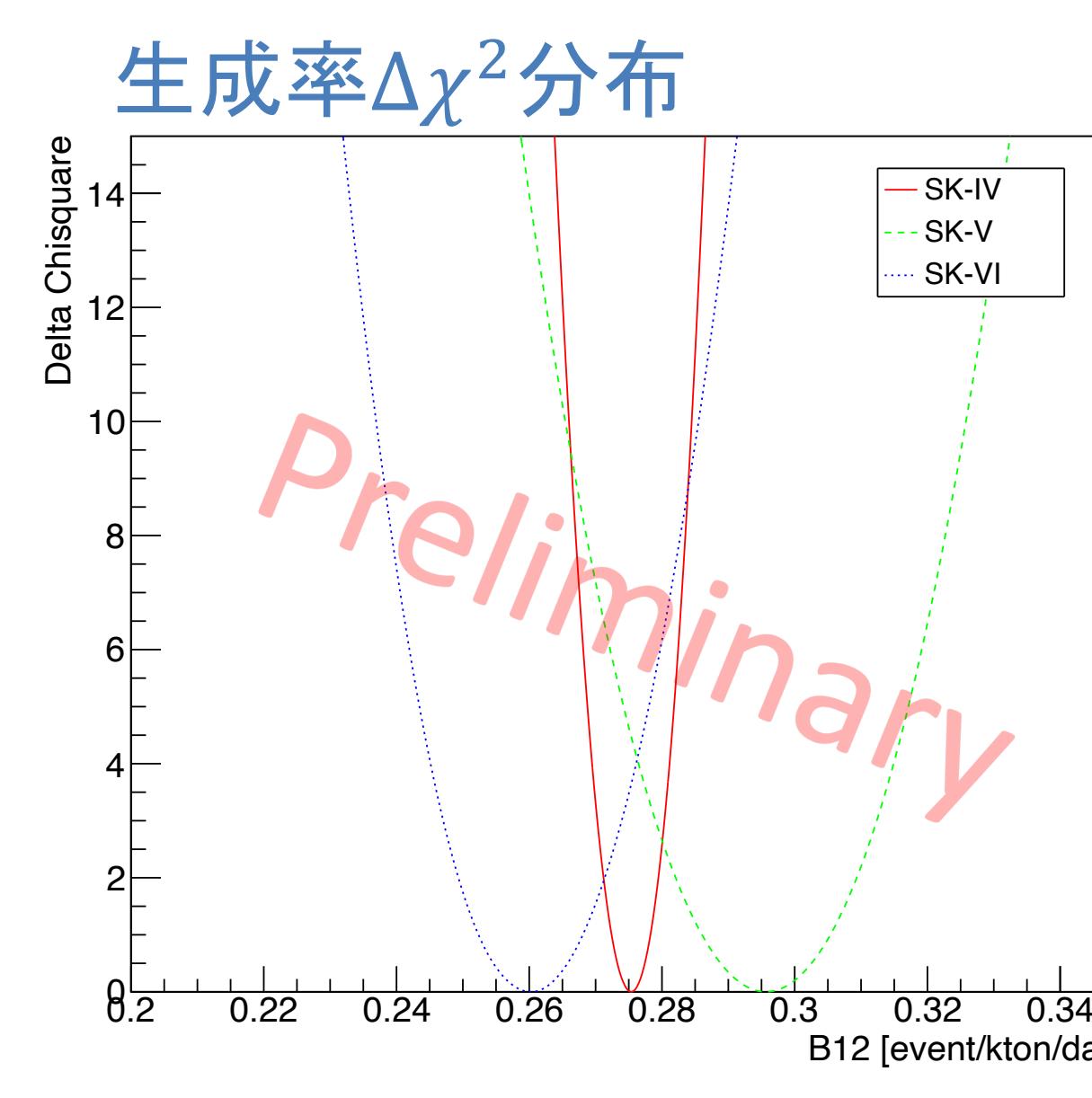
結果

	¹⁶ N	¹⁵ C
生成率 [event/kton/day]	2.23 ± 0.03	0.15 ± 0.03
分岐比 [%]	10.9 ± 0.3	0.7 ± 0.1

5. ¹²Bの生成率・分岐比測定



¹²Bは寿命が短いため、静止ミューオンから 0.5 秒以内の領域で探索。 χ^2 を用いて生成率・分岐比を決定。
(¹⁶N, ¹⁵Cの混入は4.の結果を使用)



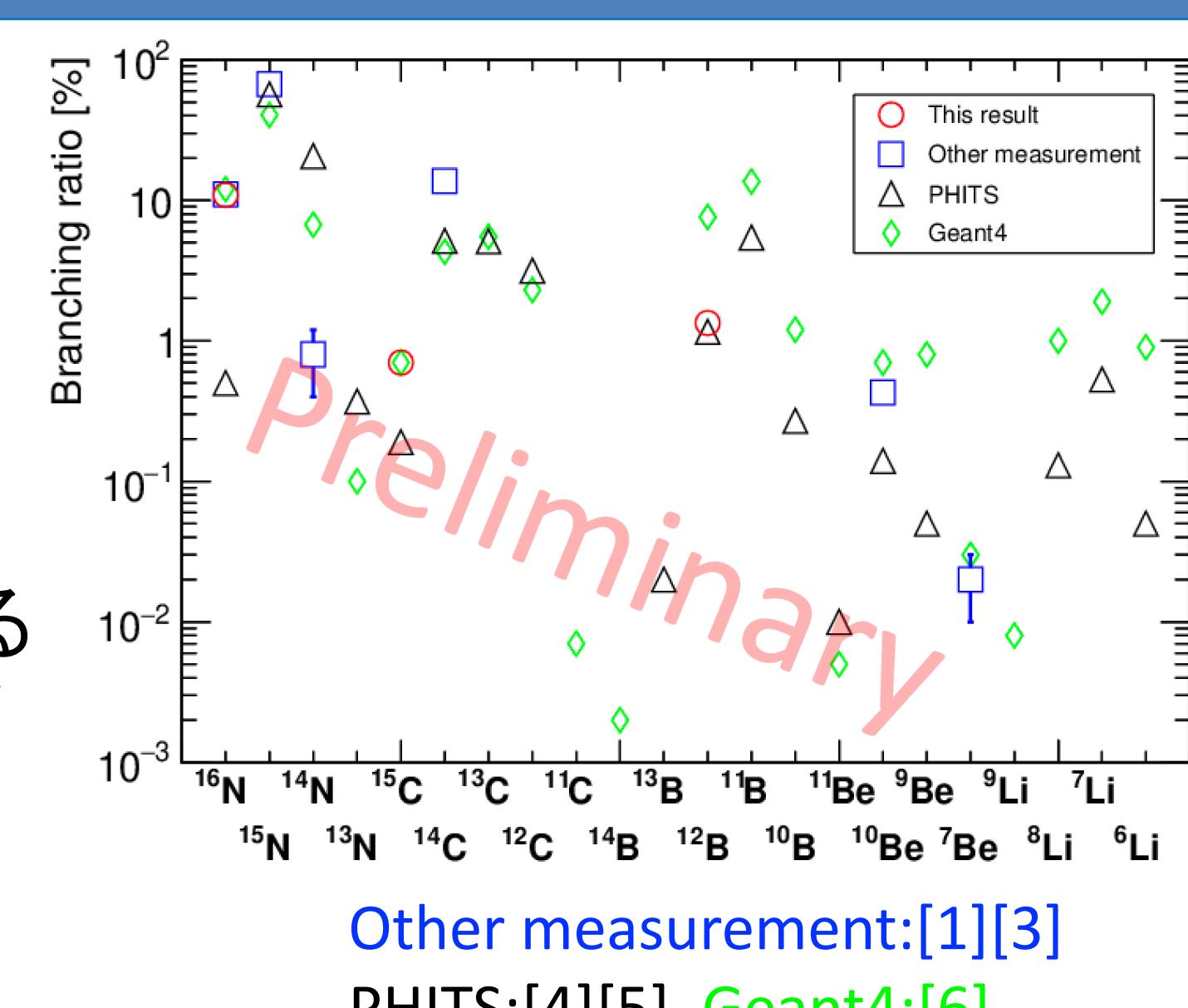
結果

	¹² B
生成率 [event/kton/day]	0.28 ± 0.01
分岐比 [%]	1.34 ± 0.04

6. まとめ

水チェレンコフ検出器のSKでは酸素とミューオンの核反応の研究が可能。

ミューオンと酸素の核反応で生成される同位体 ¹⁶N, ¹⁵C そして ¹²B の分岐比を測定した。¹⁶Nを世界最高精度で測定し、¹⁵C, ¹²B は初めて分岐比の測定をした。



Reference

- [1] D. Measday, Phys. Rep. 354, 243–409 (2001).
- [2] H. Kitagawa et al., Phys. Rev. D 110, 082008 (2024).
- [3] B. Heisinger et al., Earth Planet. Sci. Lett. 200, 357 (2002).
- [4] T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol. 50, 913 (2013).
- [5] S. Abe and T. Sato, J. Nucl. Sci. Technol. 54, 101 (2017).
- [6] J. Allison et al., Nucl. Instrum. Meth. A 835, 186 (2016).