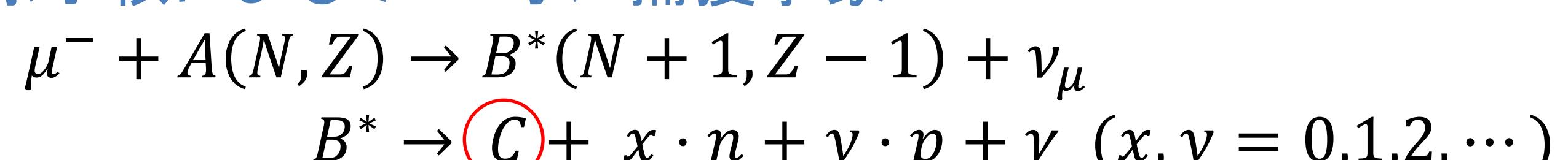


1. 本研究の目的

原子核によるミューオン捕獲事象^[1]



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、スーパーかみオカンデ(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

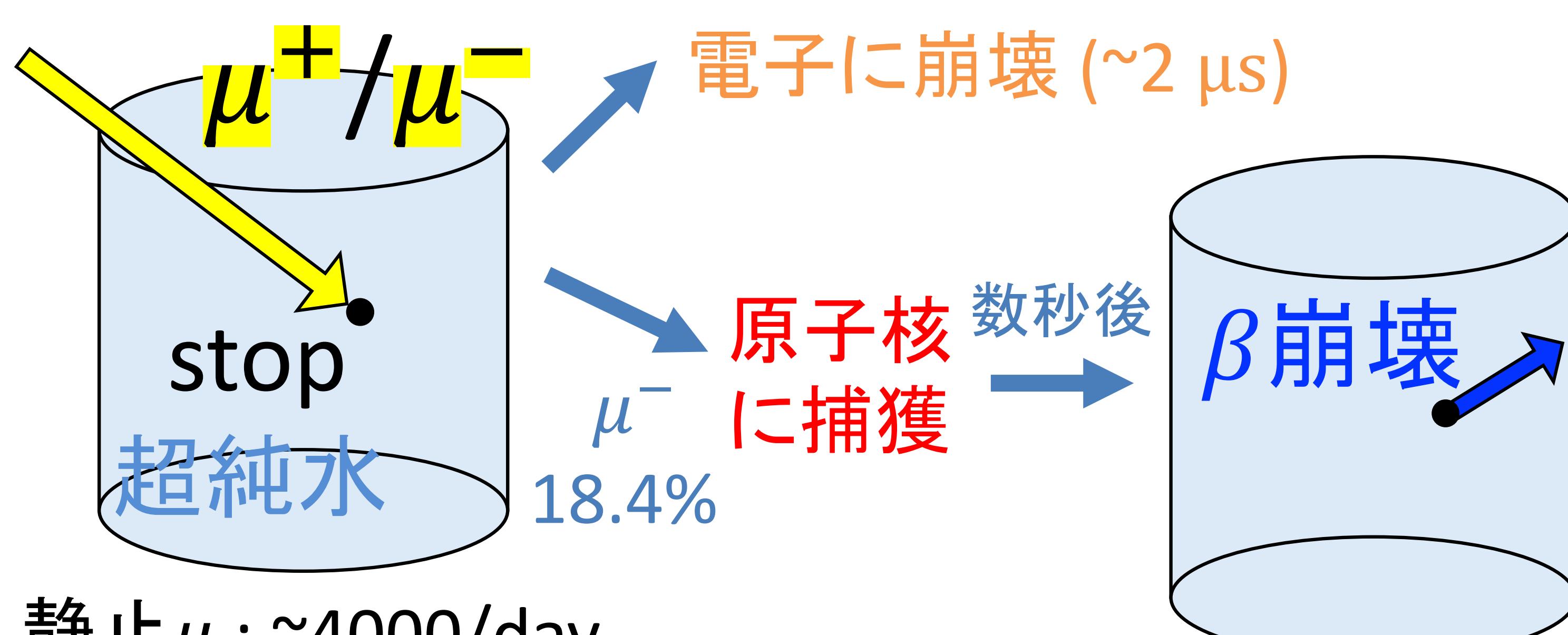
SKでは酸素原子核に捕獲され、 β 崩壊する核種(^{16}N , ^{15}C , ^{12}B , ^{13}B)が検出される。

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	$^{16}\text{O}(\mu^-, \nu)^{16}\text{N}$	10.42	7.13	
^{15}C	$^{16}\text{O}(\mu^-, \nu p)^{15}\text{C}$	9.77	2.45	
^{13}B	$^{16}\text{O}(\mu^-, \nu n 2p)^{13}\text{B}$	13.44	0.0172	
^{12}B	$^{16}\text{O}(\mu^-, \nu \alpha)^{12}\text{B}$	13.37	0.0202	

本研究は、 ^{16}N , ^{15}C および ^{12}B 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.) ハイパーかみオカンデ

2. SKにおけるミューオン捕獲事象の検出

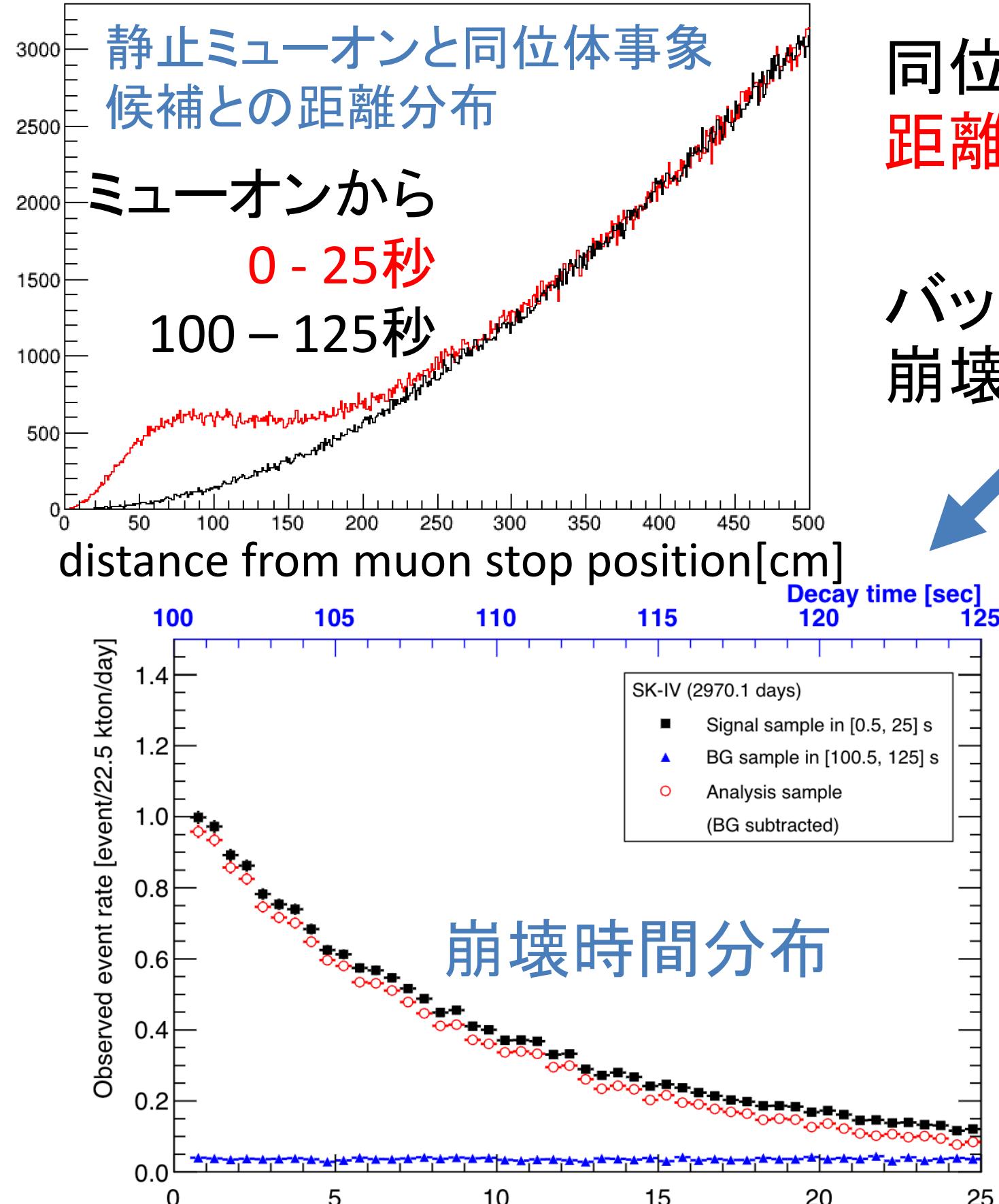


SKに宇宙線ミューオンが飛来
一部ミューオンはSK内部で静止する

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



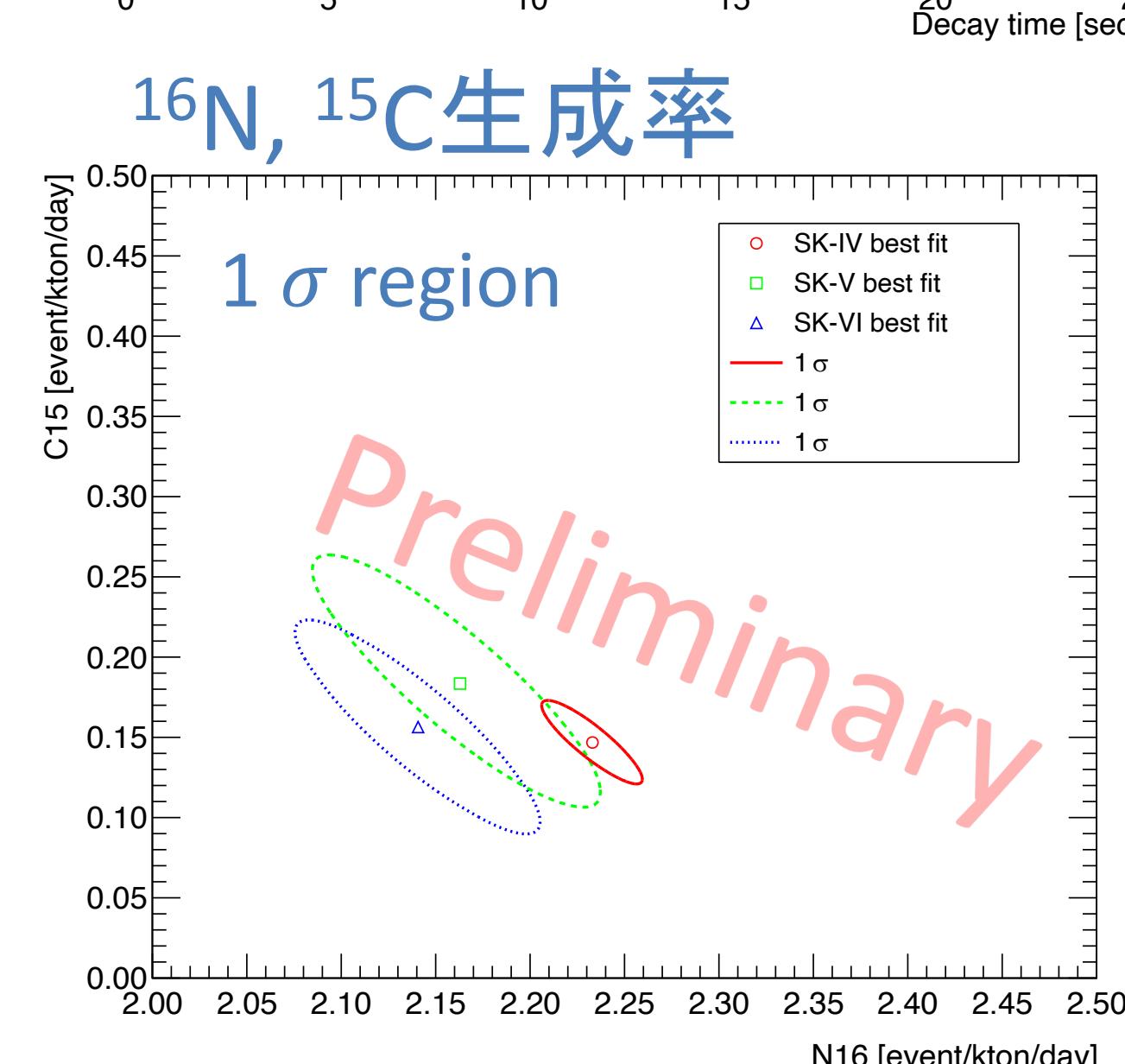
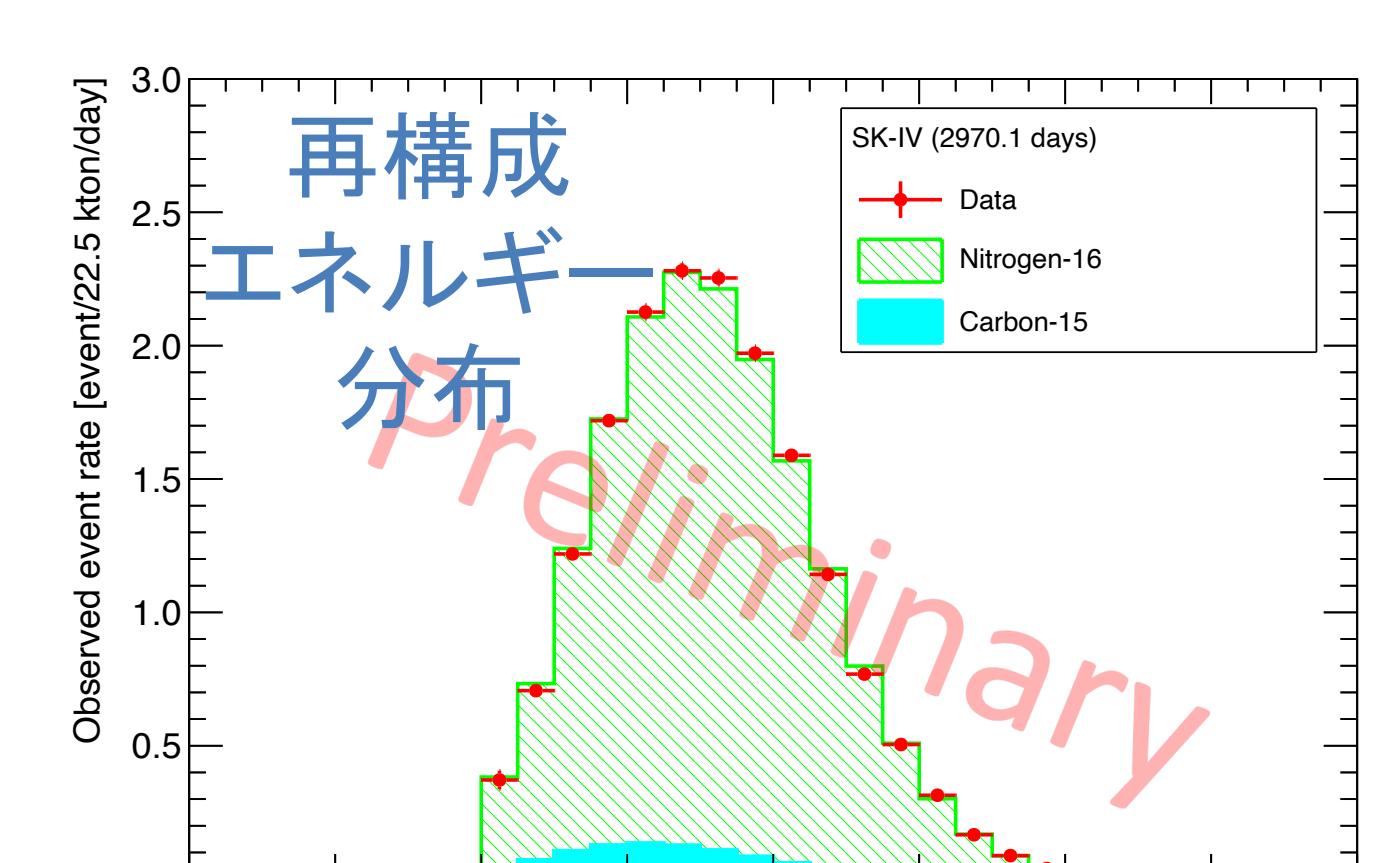
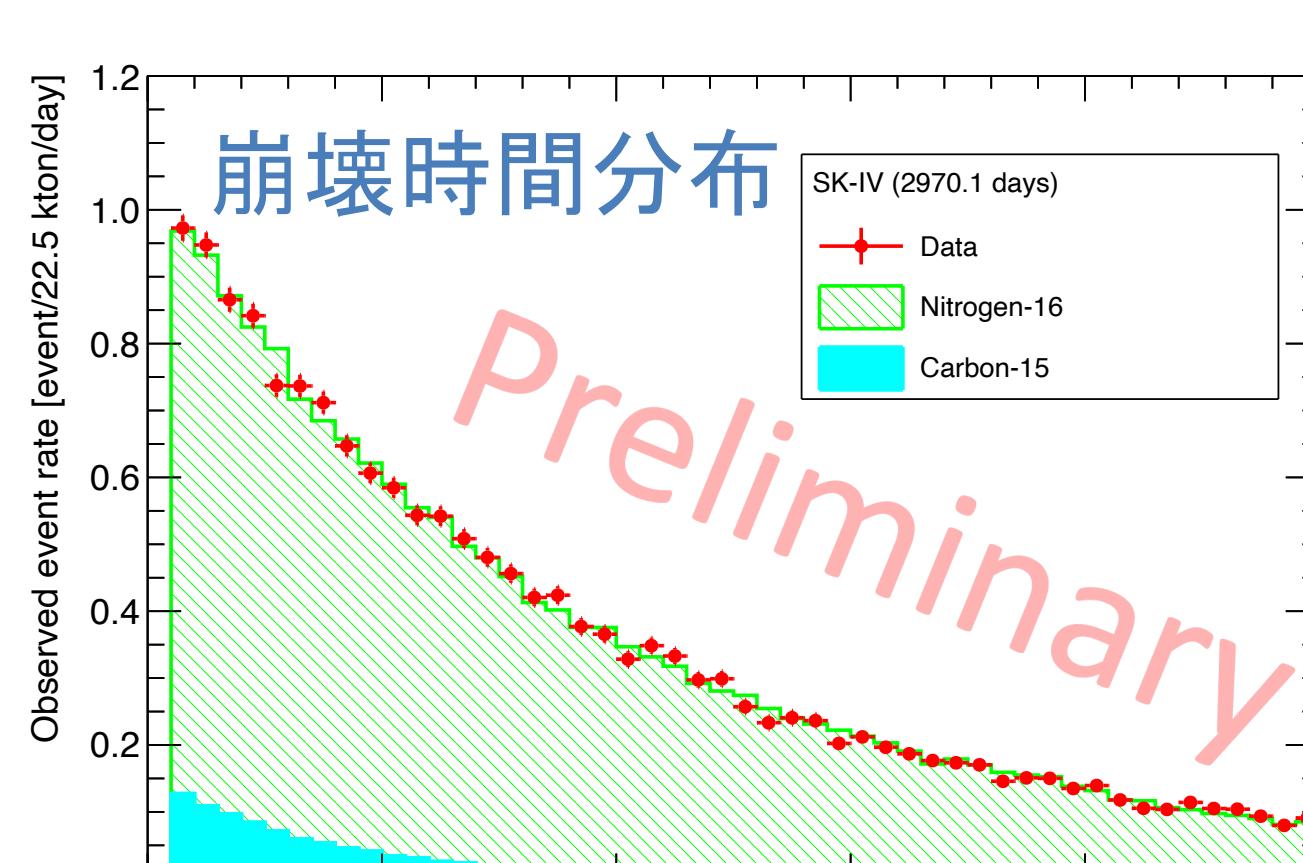
4. ^{16}N , ^{15}C の生成率・分岐比測定

χ^2 を用いて生成率を測定

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

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

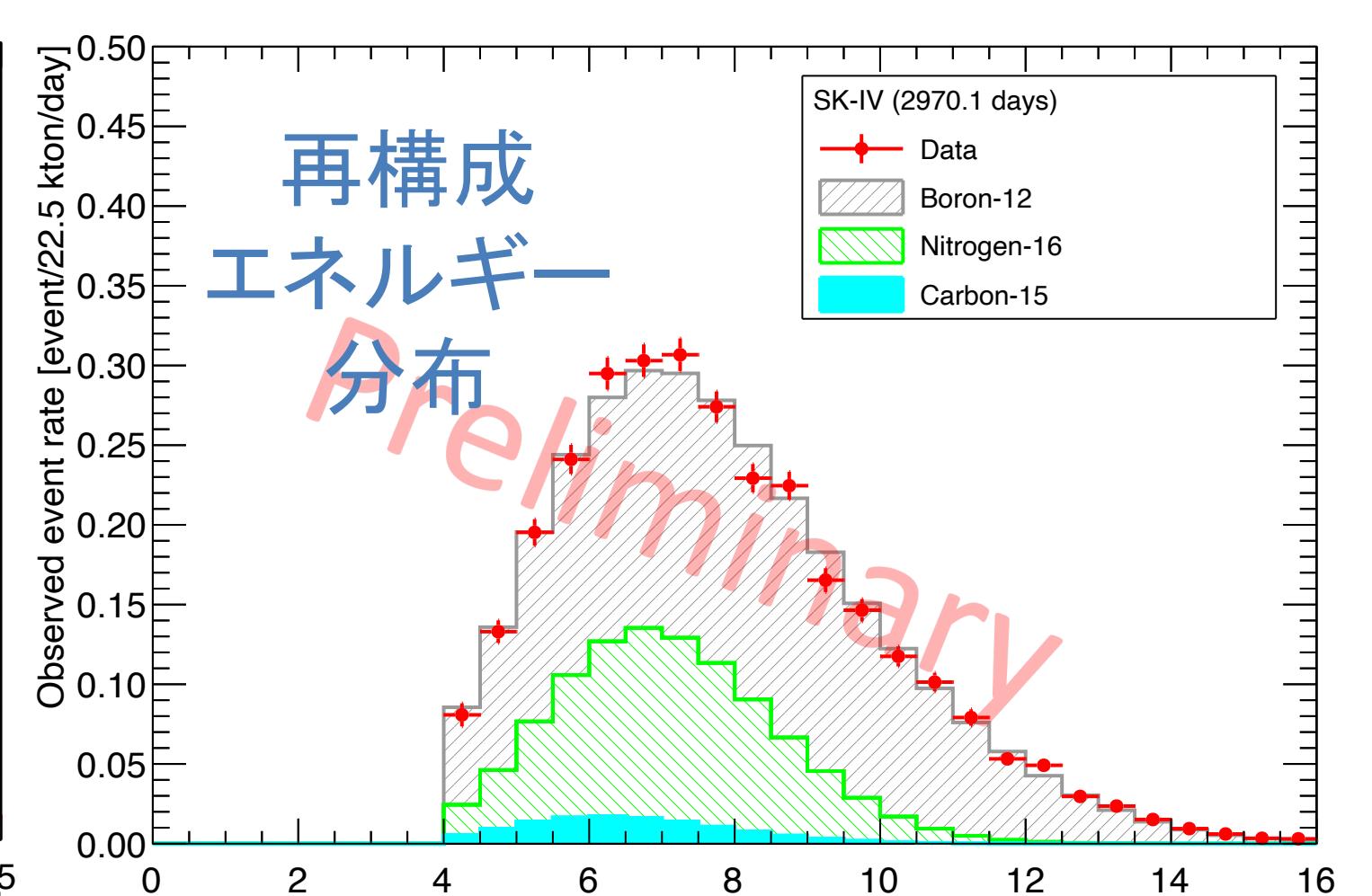
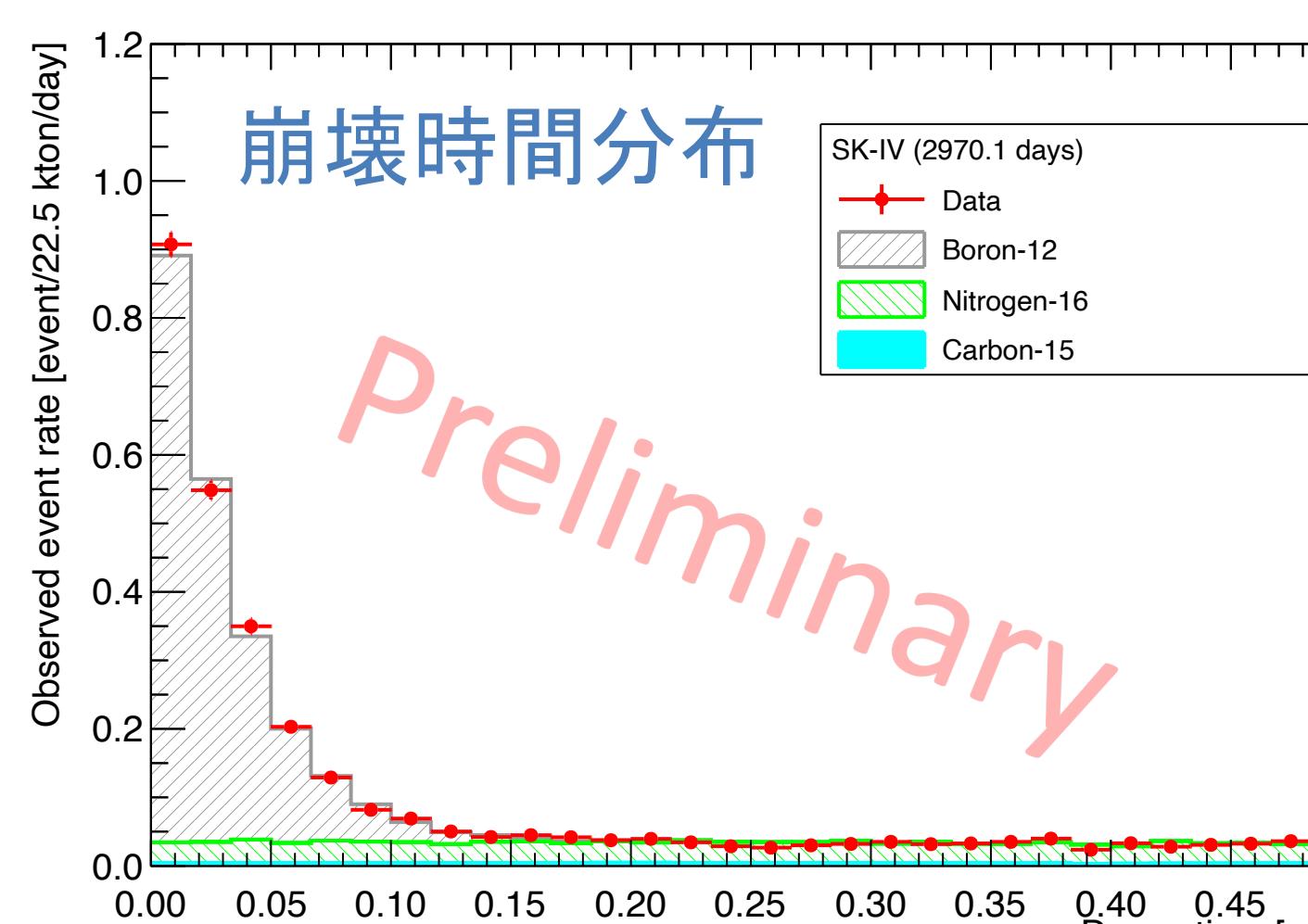
- ・ミューオンの選択効率
- ・ミューオン電荷比^[2]
- ・放射性同位体選択効率を考慮して同位体の生成率・分岐比を計算



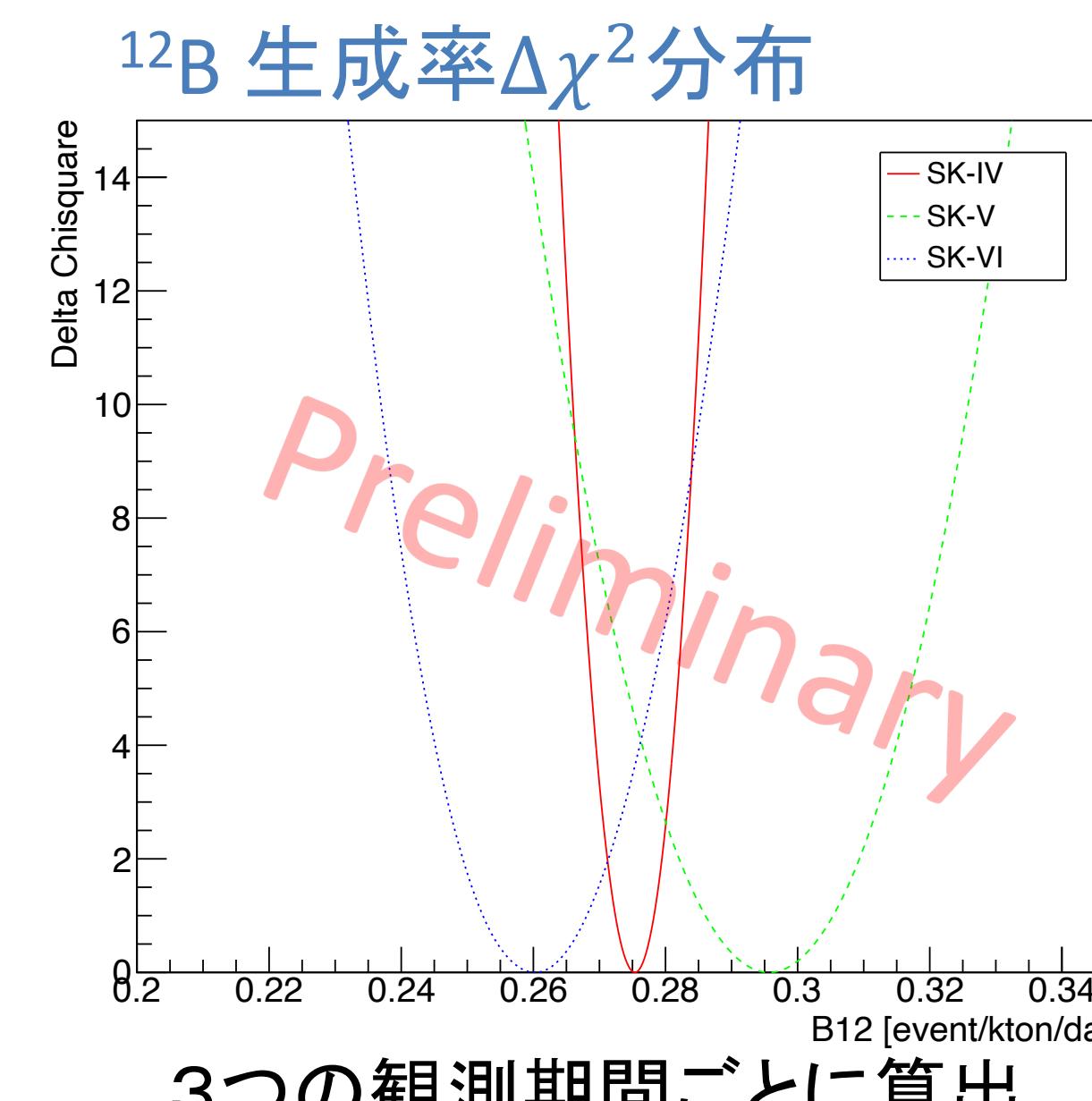
結果

	^{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. ^{12}B の生成率・分岐比測定



^{12}B 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。
(^{16}N , ^{15}C の混入は4.の結果を使用)



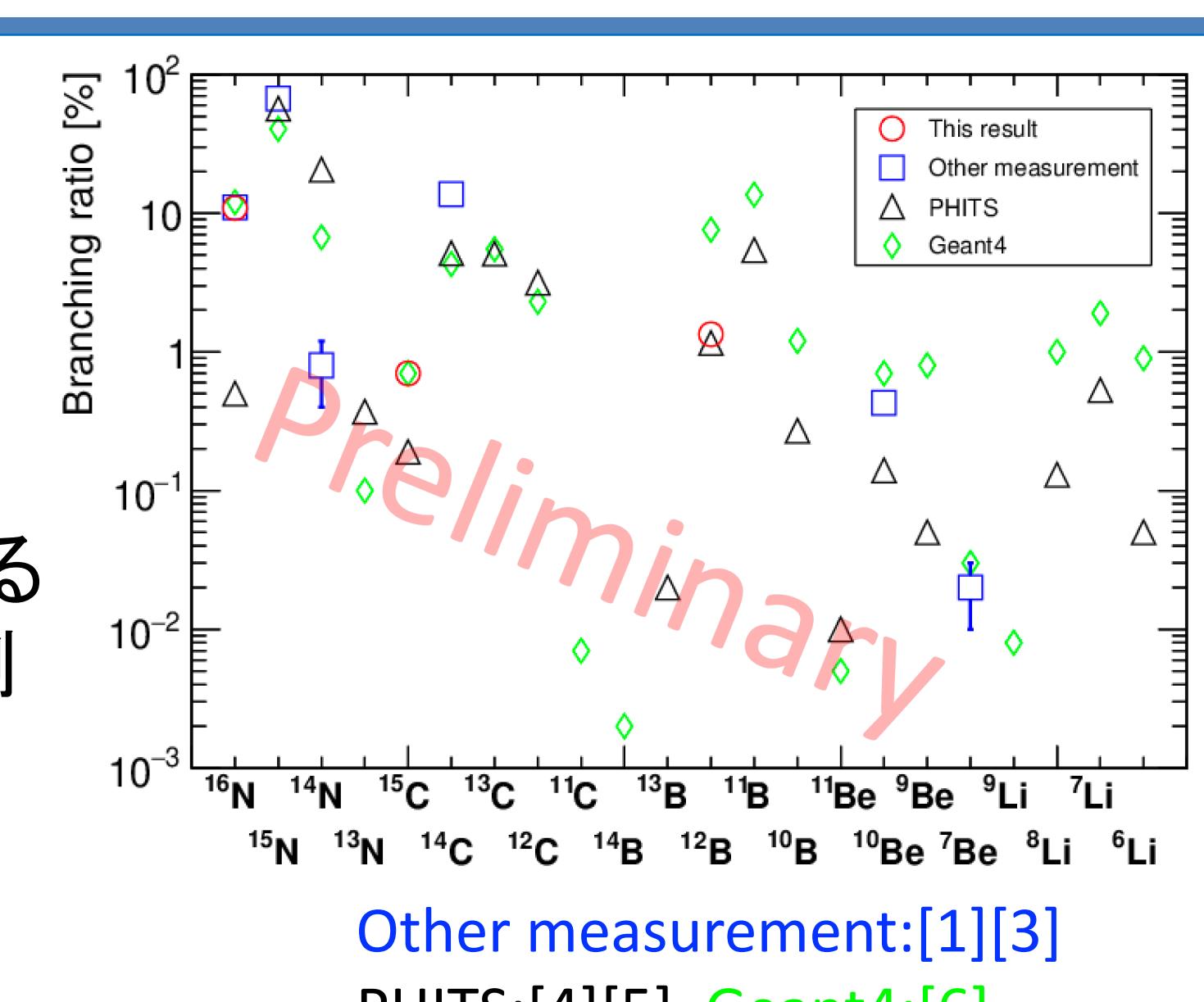
結果

	^{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 ^{16}N , ^{15}C そして ^{12}B の分岐比を測定した。 ^{16}N を世界最高精度で測定し、 ^{15}C , ^{12}B は初めて分岐比の測定をした。現在 ^{13}B も含めた解析を進めている。



Reference

- [1] D. Measday, Phys. Rep. 354, 243–409 (2001).
- [2] B. Heisinger et al., Earth Planet. Sci. Lett. 200, 357 (2002).
- [3] T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol. 50, 913 (2013).
- [4] H. Kitagawa et al., Phys. Rev. D 110, 082008 (2024).
- [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).