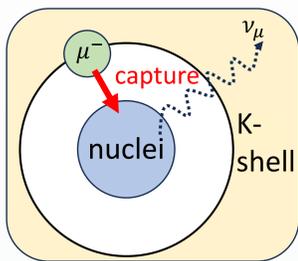
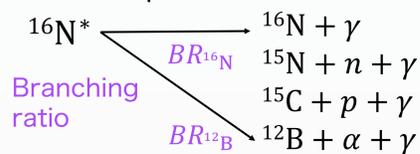
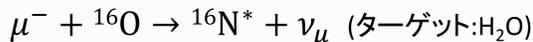




## 1. イントロダクション

### 原子核ミュオン捕獲



不安定な放射性同位体である<sup>16</sup>N, <sup>15</sup>C, <sup>12</sup>B, <sup>13</sup>Bは、それぞれの分岐比(BR)に従って生成される。これらの同位体のβ崩壊は、スーパーカミオカンデ(SK)における太陽ニュートリノ測定[2]においてバックグラウンドとして観測されている。

本研究では、SKの3902日のデータを用いて<sup>16</sup>N, <sup>15</sup>C, <sup>12</sup>B, <sup>13</sup>Bのproduction rateと分岐比(BR)を世界最高精度で測定した。

Y. Maekawa et al., Phys. Rev. C 112, 064614 (2025)

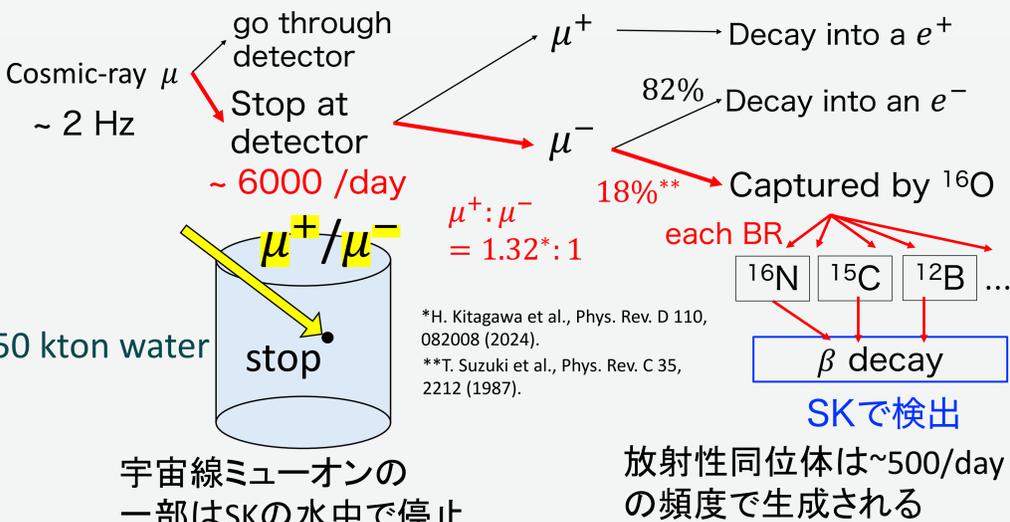
2001年に測定されたSKにおける<sup>16</sup>Nのproduction rate[3]を更新

Isotope	Reaction	Q-value of β decay [MeV]	Half-life [s]
<sup>16</sup> N	<sup>16</sup> O(μ <sup>-</sup> , ν) <sup>16</sup> N	10.42	7.13
<sup>15</sup> C	<sup>16</sup> O(μ <sup>-</sup> , νp) <sup>15</sup> C	9.77	2.45
<sup>13</sup> B	<sup>16</sup> O(μ <sup>-</sup> , νn2p) <sup>13</sup> B	13.44	0.0172
<sup>12</sup> B	<sup>16</sup> O(μ <sup>-</sup> , να) <sup>12</sup> B	13.37	0.0202

類似したQ値と半減期を持つ<sup>12</sup>Bと<sup>13</sup>Bを初めて個別に評価した。

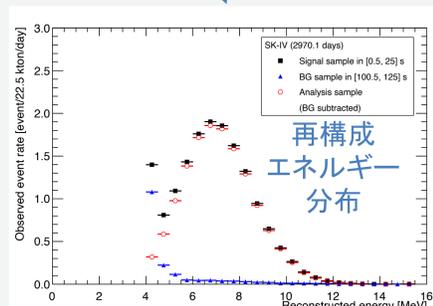
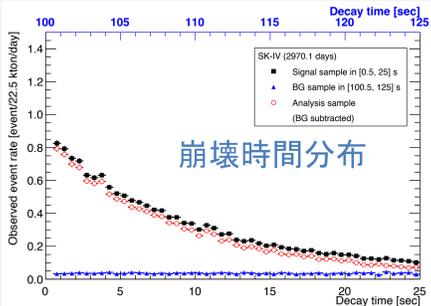
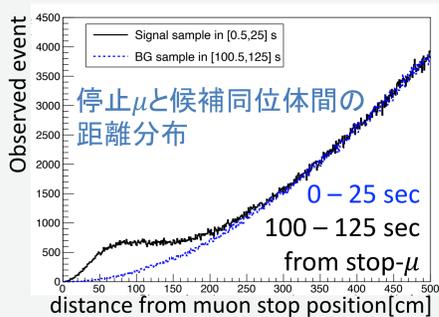
さらに、β崩壊は検出器内で均一かつ等方的に発生するため、これらの同位体を観測する手法の確立により、将来実験(e.g., Hyper-Kamiokande)における新しいエネルギー較正手段となる可能性がある。

## 2. SKにおけるミュオン捕獲事象の検出



停止μ<sup>-</sup>とβ崩壊のペアを探索することにより、生成された同位体の測定することが可能である。

## 3. 放射性同位体事象のセレクション



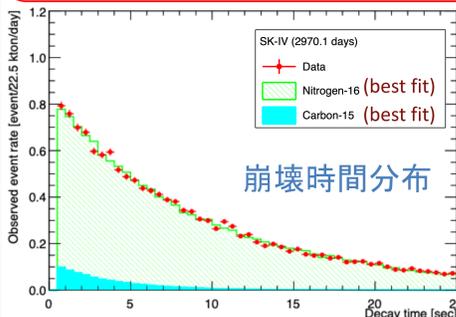
## 4. <sup>16</sup>N, <sup>15</sup>Cのproduction rateと分岐比

### χ<sup>2</sup> fitでproduction rateを決定

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

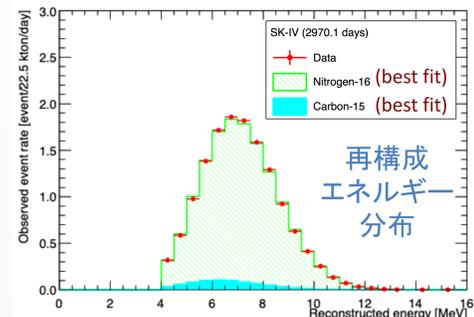
$$\chi^2_{\text{Time}} = \sum_i^{n_{\text{Time}}} \frac{(N_i^{\text{Data}} - N_i^{\text{MC}})^2}{(\sigma_i^{\text{Data}})^2 + (\sigma_i^{\text{MC}})^2 + (\sigma_i^{\text{Syst.}})^2}$$

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

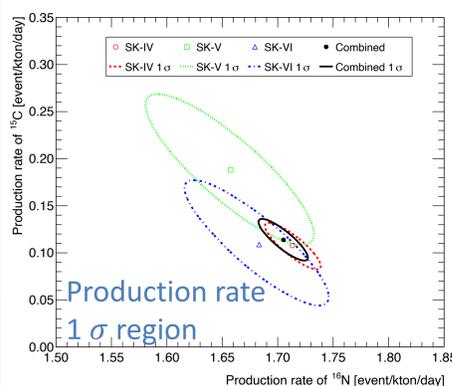


以下の要素を考慮して同位体のproduction rateとBRを計算する:

- 停止μの選択効率
- ミュオン電荷比[4]
- 同位体事象選択効率



SK phase	SK-IV	SK-V	SK-VI
期間	Sep. 2008 ~ May 2018	Jan. 2019 ~ Jul. 2020	Aug. 2020 ~ Jun. 2022
Livetime[days]	2970.1	379.2	552.2

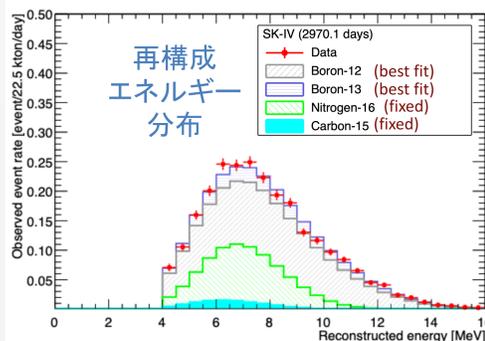
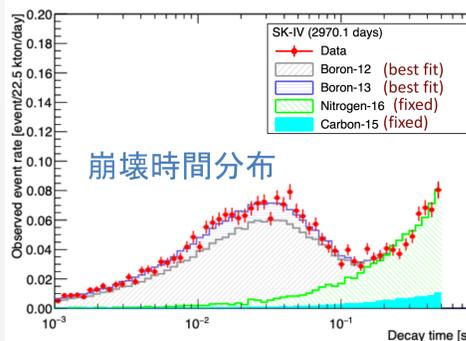


3つの観測期間 (total 3902日)のDataを用いて、best-fit値を決定。

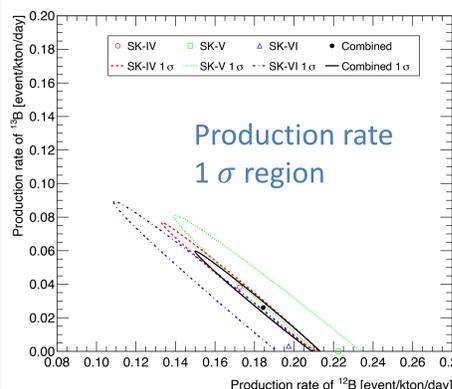
### 結果 (combined result)

	<sup>16</sup> N	<sup>15</sup> C
Production rate [event/kt/day]	1.71±0.01	0.11±0.01
BR [%]	9.0±0.1	0.6±0.1

## 5. <sup>12</sup>B, <sup>13</sup>Bのproduction rateと分岐比



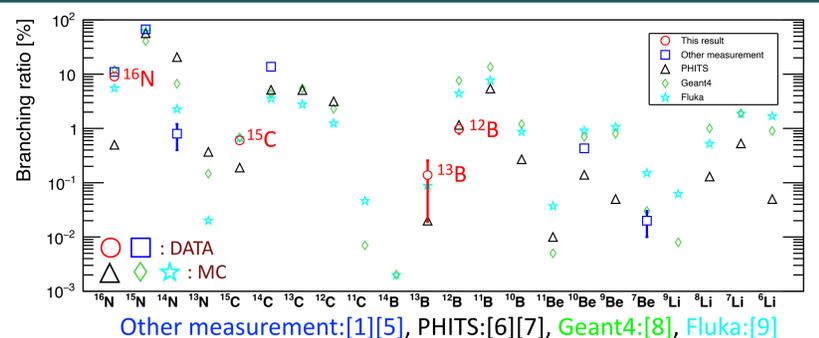
<sup>12</sup>B(<sup>13</sup>B)は寿命が短く、μの停止時間から0.5秒以内に検出される。production rateとBRはχ<sup>2</sup>フィッティングにより求まる。(16Nと15C成分は4.の結果から求めた。)



### 結果 (combined result)

	<sup>12</sup> B	<sup>13</sup> B
Production rate [event/kt/day]	0.18±0.02	0.03±0.02
BR [%]	0.98±0.18	0.14±0.12

## 6. まとめ



ミュオン捕獲で生成される同位体<sup>16</sup>N, <sup>15</sup>C, <sup>12</sup>B, <sup>13</sup>Bの分岐比を測定した。<sup>16</sup>Nの分岐比は世界最高精度で決定され、<sup>15</sup>C, <sup>12</sup>B, <sup>13</sup>Bの分岐比は初めて測定された。

### Reference

[1] D. Measday, Phys. Rep. 354, 243–409 (2001).  
 [2] K. Abe et al., Phys. Rev. D 94, 052010 (2016).  
 [3] E. Blaufuss et al., Nucl. Instrum. Meth. A 458, 638 (2001).  
 [4] H. Kitagawa et al., Phys. Rev. D 110, 082008 (2024).  
 [5] B. Heisinger et al., Earth Planet. Sci. Lett. 200, 357 (2002).  
 [6] T. Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol. 50, 913 (2013).  
 [7] S. Abe and T. Sato, J. Nucl. Sci. Technol. 54, 101 (2017).  
 [8] J. Allison et al., Nucl. Instrum. Meth. A 835, 186 (2016).  
 [9] G. Battistoni et al., Annals Nucl. Energy 82, 10 (2015).