

トリチウム汚染水放出問題

ズーム会議 2020/11/29 豊島

放出すべきでない理由

1) 生物影響が十分に解明されているとは言えない。

(RBE 値)

重要分子に取り込まれた場合、ベータ線が低エネルギーのため、その分子や周囲の構造物の中に高濃度のイオン対を生成。

同時に起こる核転換効果とによる「2ヒット効果」の可能性

2) 放出しないですむ合理的な方法があるので、ICRPのALARA*原則に反する。

60年で3.4%にまで減る。半減期の10倍(123年)では約1,000分の1。

「集団線量」が考慮されていない。概念、言葉自体の隠蔽。

「しきい値なし」の原則

* As Low As Reasonably Achievable

3) 法規制の基準値は、これほど大量の放射性物質の放出を想定して作られたものとは考えられない。

タンクの汚染水中に含まれるトリチウム約860兆ベクレルは、1年間に日本に降る雨に含まれるトリチウム量の3.9倍 - 経済産業省、それを引用した51回大会決議(原発)。

4) 実際の健康被害(白血病など)が疑われる事例が、日本を含め世界中に数多くある。

玄海原発周辺の住民の健康調査(1973年から2010年の間、原発3キロ圏内の玄海町など近隣地域)で住民検診が行われたが、その結果が秘密にされている。森永氏の研究によれば、原発の影響の疑いが濃い。

5) トリチウム以外の放射性物質が十分に除去できるかどうか分からない。

Opening the floodgates at Fukushima

Tritium is not the only radioisotope of concern for stored contaminated water

By Ken O. Buesseler

グーグル翻訳

SCIENCE 7 AUGUST 2020 • VOL 369 ISSUE 6504 621

タンクが現在のFDNPP（福島第一原発）の境界のすぐ外側に保管されていれば、海洋放出の緊急性の理由であるスペースの不足を緩和することができます。

解決策には、非トリチウム汚染物質の濃度を下げること、二次処理後に各タンク内のすべての汚染物質の濃度を個別に検証すること、および他の保管オプションを再検討することが含まれます。

幸いなことに、トリチウムは、生細胞にほとんど損傷を与えない低エネルギーの β 粒子を放出するため、比較的無害です。その結果、トリチウムは、タンクで報告された放射性同位元素の線量係数が最も低く(4)、許容放出限界が高くなっています(表を参照)。これらの特性は、大量のトリチウムが有害な影響を与え

る可能性を損なうものではなく、潜在的な健康への影響については議論が続いています。

タンクに含まれるトリチウムの総量も重要であり、約1 PBq (PBq = 10^{15} Bq) と報告されています(5)。その合計は、1960年代の全球大気核実験からまだ残っている8000 PBqのトリチウム、または大気中でトリチウムを形成する宇宙線生成粒子と窒素の間の自然相互作用からの2000PBqよりはるかに少ない。さらに、すべての原子力施設はトリチウムを排出します。トリチウムは、プラントの設計によっては、Cap de La Hagueなどの核燃料再処理計画の場合のように年間数PBq、またはそれ以上になる可能性があります(6)。

しかし、この話はトリチウムだけでなく、他に何がタンクにあるかについてです。FDNPPのオペレーターである東京電力がルテニウム-106、コバルト-60、ストロンチウム-90などのより危険な同位体の量を詳述したデータを発表したのは2018年半ばまででした(7)。これらの放射性同位元素の濃度はトリチウムよりも桁違いに低いですが、タンクごとに大きく変

動します(図を参照)。東京電力独自の評価によると、タンクの70%以上は、放出のために法律で要求される濃度よりも濃度を下げるために二次処理が必要です(7)

タンクの解放の結果を評価するには、各タンクに残っている同位体の二次処理後の完全な説明が必要です。これには、現在報告されている9つの同位体だけでなく、プルトニウムなどの考えられる汚染物質のより大きなセットの量も含まれます。プルトニウムはFDNPP冷却水に存在する可能性があります、2011年には大気中に大量に放出されませんでした。

海洋排出以外の選択肢はほとんどないと一般に言われています。ただし、タンクで知られている同位体の半減期が短いことを考えると、時間が役立つでしょう。半減期が12.3年の場合、60年で、トリチウム全体の97%が崩壊し、他のいくつかの短命の同位体も崩壊します。現場でのそれらの間にある数年間の浄化では、現在の量の約4倍が生成されます。日本が石油や液化天然ガスに対してすでに行っているの

と同様に、耐震タンクに貯蔵されたとしても、タンクの漏れのリスクは、崩壊後の大幅に減少した放射性と比較検討する必要があります。タンクが現在のFDNPPの境界のすぐ外側に保管されていれば、海洋放出の緊急性の理由であるスペースの不足を緩和することができます。

廃水貯蔵タンク内のトリチウムに対する現在の焦点は、他の放射性同位体を無視していますが、解決可能な問題を提示しています。解決策には、非トリチウム汚染物質の濃度を下げること、二次処理後の報告で各タンク内のすべての汚染物質の濃度を個別に検証すること、および他の保管オプションを再検討することが含まれます。放出があった場合、海水、海洋生物群系、および海底堆積物中の複数の汚染物質の独立した海洋研究を支援することは、前、最中、および後に行われるべきです。オペレーターはこれのいくつかを約束しましたが、行動は言葉よりも重要です。議論に追加する必要があるのは、これらのタンク内の非トリチウム同位体は、海洋での毒性と運命が大きく異なるということです。

2 ヒット効果

「これら二本の飛跡(または相関した飛跡)は、突然変異の固定化を誘発する高い確率を持っていると、ほとんどの人が考えている。なぜなら、DNA の 2 本鎖の両方に、「2 本鎖断裂(double strand break)」という細胞修復が困難な事象を引き起こすような形で損傷を与えることができるからである。これは突然変異効率を増加させる真の理由ではないかもしれないが、2 ヒットが突然変異を引き起こす非常に大きな確率を有しているという考えは、現在十分に受け入れられている。」(ECRR 2010 年勧告、p.150)

核転換効果と高濃度イオンとの「2 ヒット」

トリチウムでは、重要分子に組み込まれたものが崩壊した場合、核転換効果と高濃度イオン（ベータ線が低エネルギーのため）により、一つの細胞内、または同一の細胞核の中で「2 ヒット」が起きる可能性が高い。現在の ICRP などの防護理論でこれが考慮されているか不明。

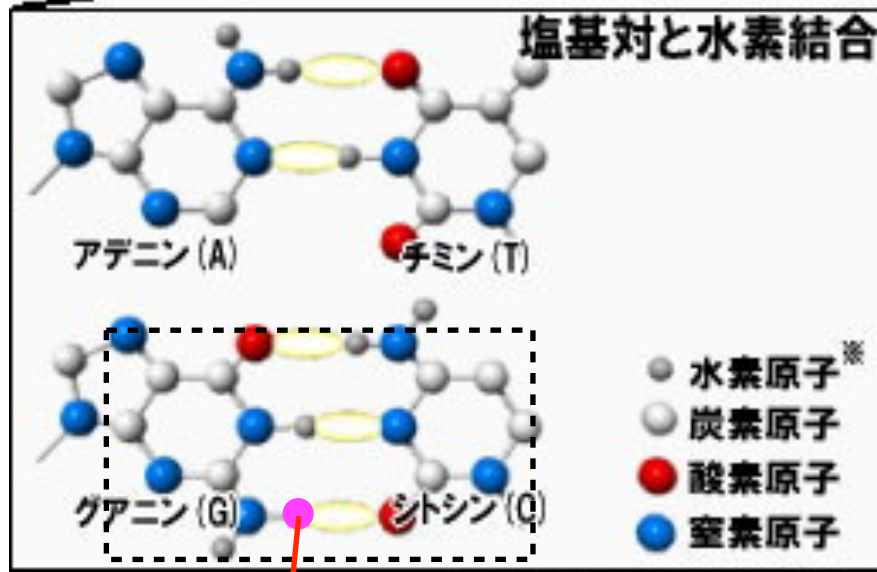
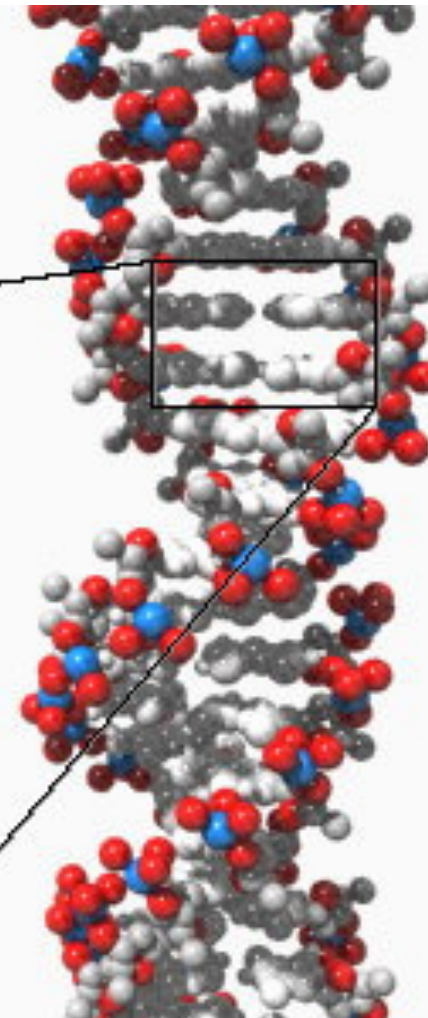
表6.3 特定の内部同位体生化学的強調係数 w_k = 元素転換

同位体あるいは部類	係数 w_k	強調効果の機構
トリチウムH-3	10~30	核壊変と局所線量；水素結合；酵素増幅 (Enzyme amplification)
イオン性平衡カチオン (Ionic equilibria cations) 例えばK, Cs, Ba, Sr, Zn	2~10	界面イオン吸着による局所濃 (Local concentration by interfacial ionic adsorption)；考慮する効果に依存
DNA結合物 (DNA bindings) 例えばSr, Ba, Pu, Ra, U	10~50	DNAの1次、2次、3次構造の崩壊。局所転換電離 (Local transmutation ionization)
14-C	5~20	核壊変と酵素増幅
35-S, 132-Te	10	元素転換と酵素増幅；水素結合
酵素と共酵素探求物 (Enzyme and co-enzyme seekers) 例えばZn, Mn, Co, Fe	10	酵素増幅
脂肪に溶ける希ガス 例えばAr-41, Kr-85	2~10	考慮する効果に依存
元素境界転換系列 (Barrier transmutation series) 例えばSr-90/Y-90	2~1000	考慮する効果に依存

DNA(deoxyribonucleic acid)

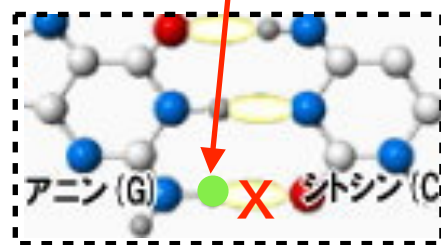
基本的な性質・構造

- ・二重らせん構造
- ・多点水素結合
- ・直径約20 Å
- ・一巻き10塩基対



※炭素原子に付いているものを除く

トリチウム原子 → ヘリウム



● トリチウム原子

● ヘリウム原子

水素結合の破壊

The Effects of Ionizing Radiation on Mammalian Cells

John E. Biaglow, Case Western Reserve University, Cleveland, OH 44106

Journal of Chemical Education, Vol. 58 Nr. 2 Feb. 1981 から。(グーグル翻訳)

放射線損傷のターゲット

放射線誘発細胞殺傷の主な標的はDNA分子であると考えられています(2-6)。この中心位置を占めるDNAの証拠は多様であり、直接のおよび間接的に取得されます。たとえば、次のようになります。

1) ターゲットのサイズは重要であり、細胞の遺伝物質を含む核が細胞の大部分を構成しているため、DNA分子の「ヒット」に対するlikelihoodは統計的にかなりあり得ます。

2) DNA分子は独特で冗長性が低いため、各分子は脂質などの冗長性の高い化合物よりも脆弱です。また、細胞活動の制御におけるDNAの中心的な位置により、DNAは重要になり、転写と翻訳によって損傷が「増幅」されます。

3) 細胞核への直接照射（マイクロビームなど）は、細胞の細胞質への照射よりも何倍も効率的です。

4) 染色体の損傷は致死性と平行しています。

5) 多くの関連する細胞や生物の感度は、DNAの含有量と、ある程度はDNAの塩基組成に匹敵します。

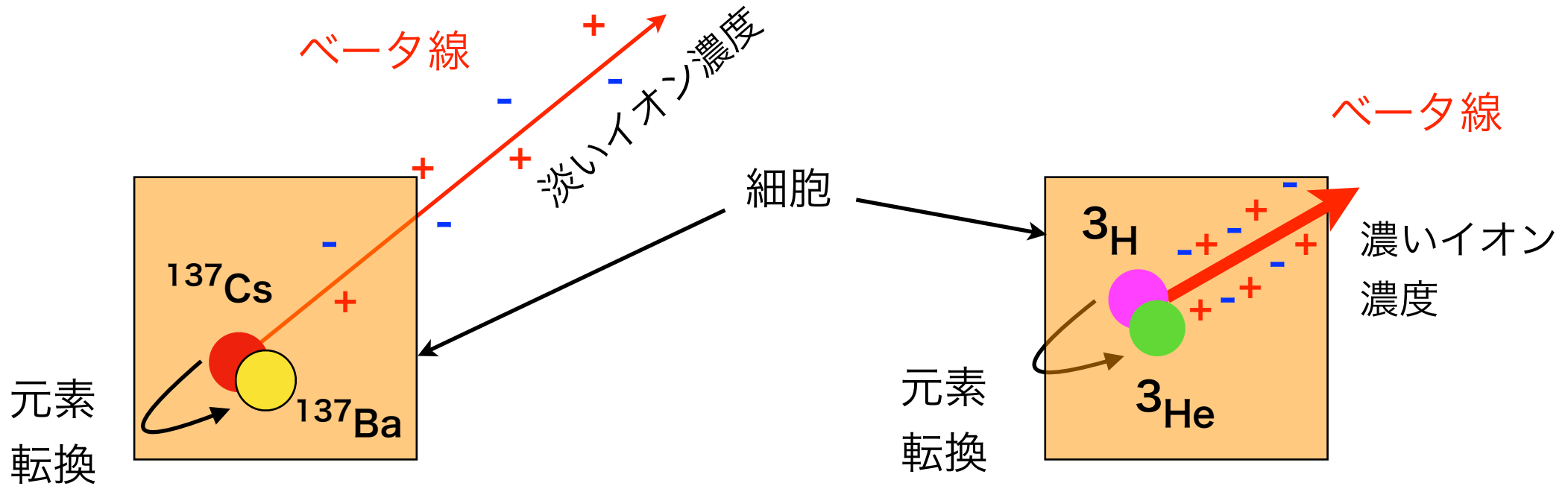
6) 3H-チミジンなどの放射性分子をDNAに組み込むと、非常に効率的な細胞死滅がもたらされます。

7) 塩基類似体（例えば、5-ブロモデオキシウリジン）をDNAに組み込むと、電離放射線に対する感受性が高まります。

8) 細胞死滅は、DNAへの構造的損傷（例えば、二本鎖切断;上記の4も参照;染色体損傷）に関連していることが示されています。

.....

内部被曝：セシウム137とトリチウム

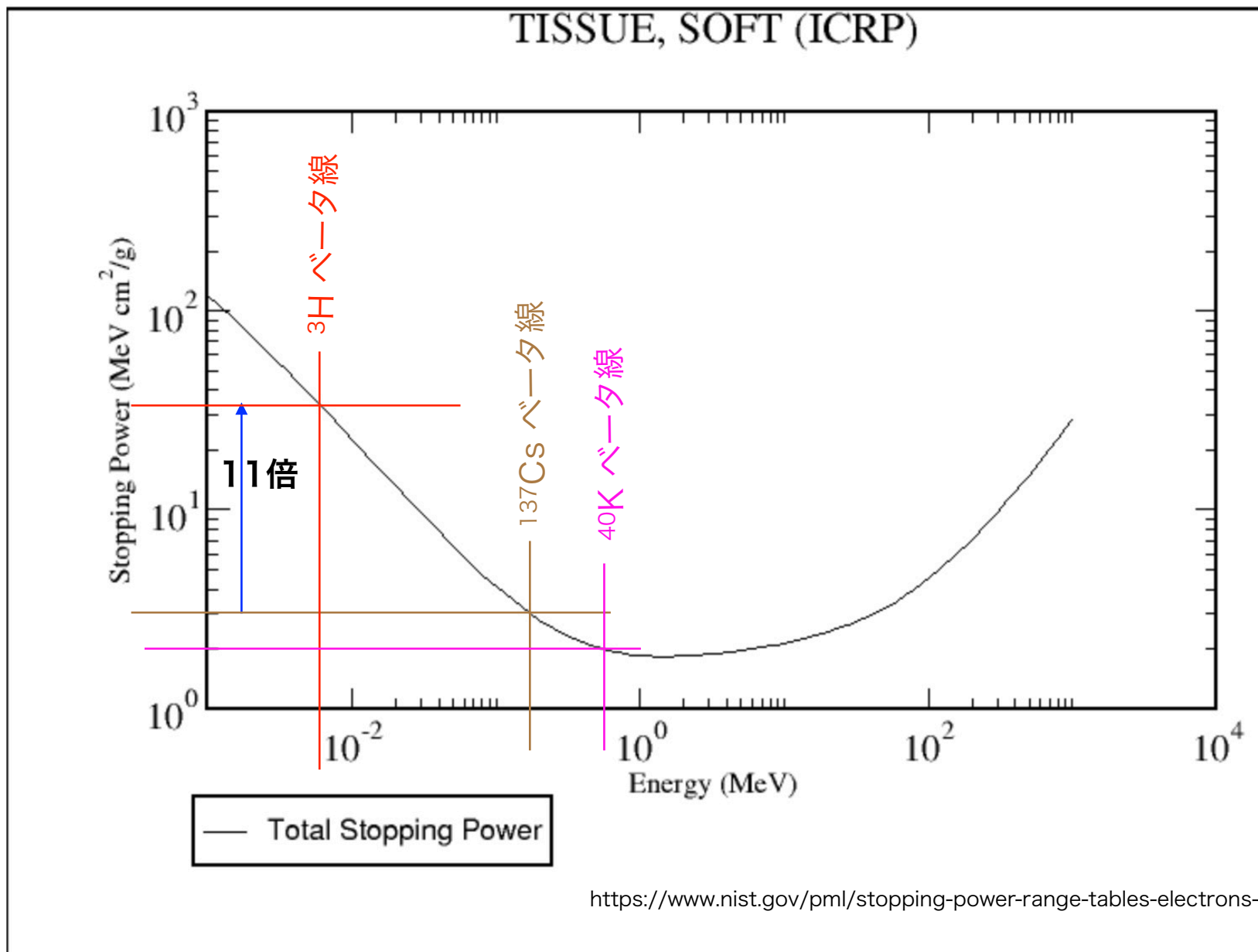


- ◎ $^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He}$ の元素転換で水素結合が破壊される可能性
 - ◎ トリチウムからのベータ線は低エネルギーのため放出点でも濃いイオンを作る
- したがって元素転換によるダメージとベータ線によるダメージが同一の細胞で起きる確率が大
→ 「2ヒット効果」の確率が大

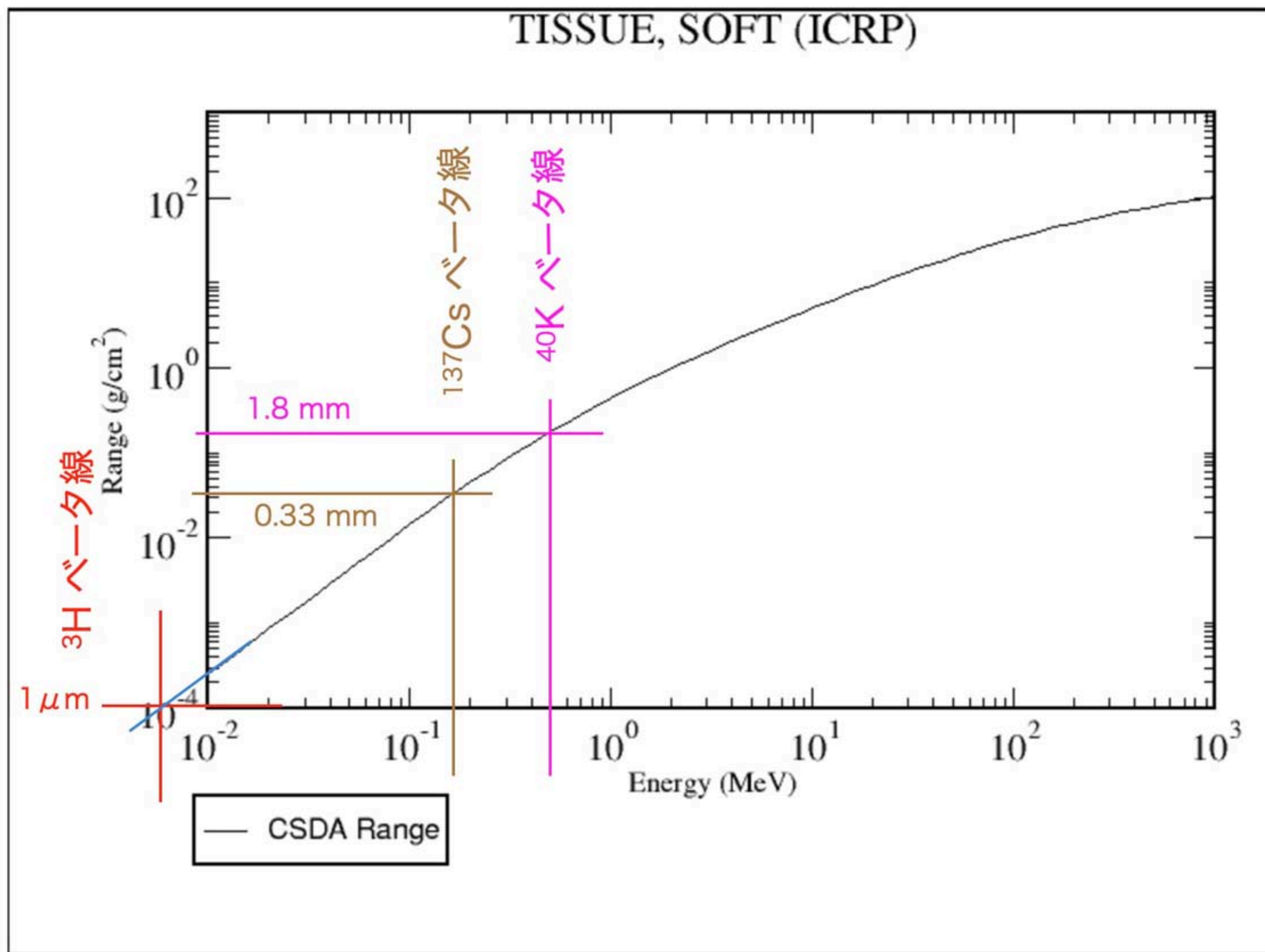


軟組織に対するベータ線の阻止能（イオンの濃度に比例する量），アメリカ商務省のサイトで計算

ESTAR : Stopping Power and Range Tables for Electrons



ESTAR : Stopping Power and Range Tables for Electrons



トリチウム

β 最大 E	0.0186 MeV	> 平均値	0.0057 MeV ¹
飛程 (最大)	7.8 μ m	平均	1 μ m (およそ)
阻止能	3.3 keV/ μ m (平均値のエネルギーで)		

¹³⁷Cs

β 最大 E	0.514 MeV	> 平均値 ²	0.1713 MeV
飛程 (最大)	1.8 mm = 1,800 μ m	平均	0.33 mm (およそ)
阻止能	0.30 keV/ μ m (平均値のエネルギーで)		

細胞のサイズ 20 - 30 μ m 核のサイズ 6 - 10 μ m

「出発」細胞内 (20 μ m) でのエネルギー付与

tritium : 5.7 keV (平均). 最大エネルギーでもほぼ1つの細胞内で静止するので、最大は18.6keV

¹³⁷Cs : 0.30 [keV/ μ m] x 20 [μ m] = 6.0 keV (平均)

エネルギー付与の平均値ではほぼ同じ値だが、最大値はトリチウムの方が大きい。

⁴⁰K

β 最大 E 1310.89 keV > 平均値 560.18 keV

(<https://www.nndc.bnl.gov/nudat2/decaysearchdirect.jsp?nuc=40K&unc=nds>)

¹ 坂本「放射線生物学」秀潤社、1998、p.168

² 平均エネルギーは最大値の約1/3 (加藤「放射線計測」p.8)