

同じ同族アルカリ金属元素の Na も、K も、Cs もデジタルな認識わけをできる、というのが、生命体の基本です。まずは、これを解説します。

元素表を見てみましょう。

hydrogen 1 H 1.0079									
lithium 3 Li 6.941	beryllium 4 Be 9.0122								
sodium 11 Na 22.990	magnesium 12 Mg 24.305								
potassium 19 K 39.098	calcium 20 Ca 40.078	scandium 21 Sc 44.956	titanium 22 Ti 47.867	vanadium 23 V 50.942	chromium 24 Cr 51.996	manganese 25 Mn 54.938	iron 26 Fe 55.845	cobalt 27 Co 58.933	nickel 28 Ni 58.693
rubidium 37 Rb 85.468	strontium 38 Sr 87.62	yttrium 39 Y 88.906	zirconium 40 Zr 91.224	niobium 41 Nb 92.906	molybdenum 42 Mo 95.94	technetium 43 Tc [98]	ruthenium 44 Ru 101.07	rhodium 45 Rh 102.91	palladium 46 Pd 106.42
caesium 55 Cs 132.91	barium 56 Ba 137.33	* 57-70	lanthanum 57 La 174.97	hafnium 72 Hf 178.49	tantalum 73 Ta 180.95	tungsten 74 W 183.84	rhenium 75 Re 186.21	osmium 76 Os 190.23	iridium 77 Ir 192.22
francium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]	* 89-102	actinium 89 Ac [227]	rutherfordium 104 Rf [261]	dubnium 105 Db [262]	seaborgium 106 Sg [263]	bohrium 107 Bh [264]	hassium 108 Hs [269]	meitnerium 109 Mt [268]
									platinum 78 Pt 195.08
									gold 79 Au 196.97

(他サイトからの転用に手を加えました)

一番左にある Na や K や Cs は、「アルカリ金属元素」とよばれ、化学的性質や、物理学的性質が非常に似ています。

多くの化学反応においては、Na や K といった、同族元素はほぼ100パーセント置換可能な反応が多いにもかかわらず、「進化」の過程で、生命体の中の分子というのは、同族元素の認識わけができるようになった。これが、生物を理解するときに、化学や物理だけの知識では足りない、ひとつの所以です。

つぎに、なぜ、とりたてて、こんなことを解説しているのか？

それは、生命体の細胞にとって、Na や K というのは、とても大事な働きをしているからです。

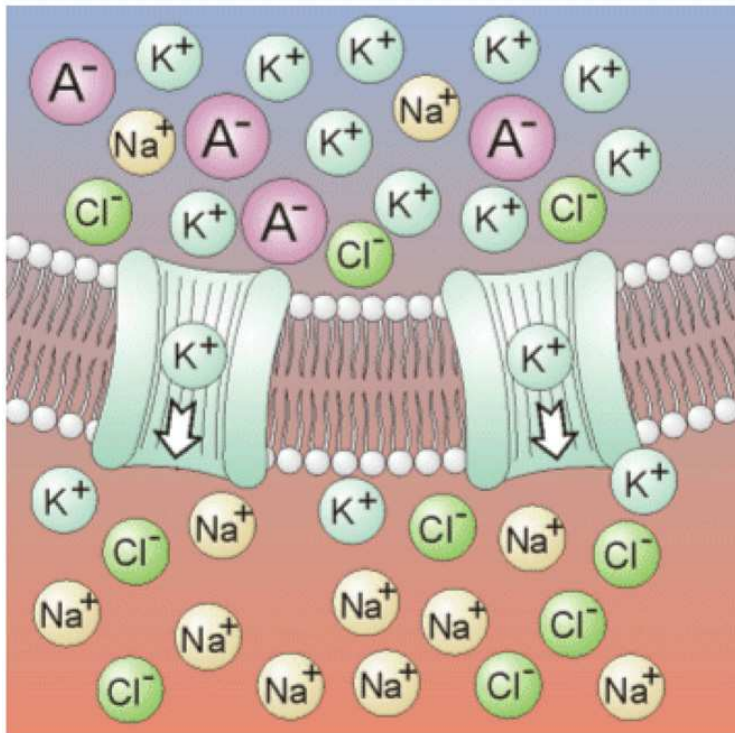
生物の細胞は、細胞膜という脂質の膜で囲まれていて、ちょっと乱暴な言い方をしますが、電荷を帯びたイオンは、通常この膜を通過することはできない。

それでは面白くないので、神様は、**イオンチャネル**という分子を設計して下さって、Na イオンや K イオンが、選択的に、細胞内外に、膜を越えて、行き来できるようになりました。(神様なんて言葉をつかっていますが、進化の過程で、そういう生命体分子を獲得した、ということです)イオンチャネルというのは、特定のイオン(Na チャネルなら Na イオン、K チャネルなら K イオン、など)を、選択的に、細胞膜内外に通すことのできる通路のようなものです(下の図)。目的に応じて、自由自在にこの通路を開いたり閉じたりすることで、いろんな重要な機能を果たしています。

そのおかげで、細胞内外のイオン濃度勾配というものを創出できるようになりました。

言ってみれば、生命体の細胞が電池として機能することができるようになり、言ってみりゃ、電池の充電、放電を繰り返して、細胞は機能しているわけです。

細胞内: 高 K^+ イオン、低 Na^+ イオン

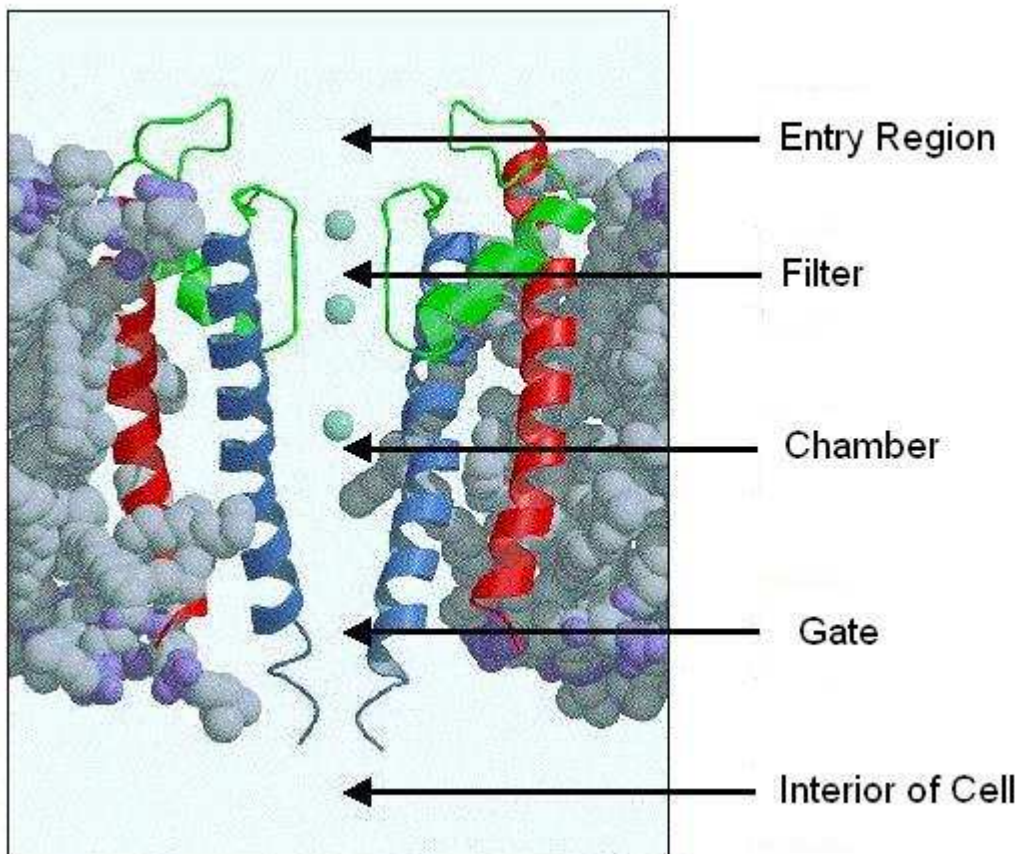


細胞外: 低 K^+ イオン、高 Na^+ イオン

(他サイトからの転用に手を加えました)

で、その電池にの充放電に関わる、ひとつの分子について、説明&確認しておきたいと思います。

K イオンを選択的に通す、 K チャンネルというものに関してです。断面図を描くと、次のとおり。真ん中のチャンネルを通して、 K イオンが細胞内外に行ったり来たりします。いろんな種類の K チャンネルがあります。



まず、第一の重要事項。Kチャンネルの面白い性質にかんして。

<<<K イオンが K-channel を通過するときは、抵抗ゼロ、時間ゼロで通過し、フリーの水分子に囲まれているときと挙動が変わらない>>>

K-channel の3次元構造解析で2003年にRod MacKinnonがノーベル化学賞をとってるんですが、なぜ、彼の仕事があそこまで評価されているか、というと、前にも書いたように、NaイオンとKイオン、これは(CsとKの類似と同じように)同族アルカリイオン金属で、物理的にも化学的にも、ほぼ100パーセント置換可能な反応が多い、ごく似通った元素であるにもかかわらず、**生命体の K-channel は、絶対に Na イオンを通さない。**Naイオンのほうが、サイズが小さいにも関わらず、です。

これを、K-channelの「高い選択性」と言います。

一方、Kイオンは、フリーなポアと同じようにこのチャンネルを素通りできる。抵抗ゼロ、時間ゼロで通過します。

これを「高い通過性」と言います。

この、どう考えても、**矛盾してしまう「高い選択性」と「高い通貨性」をいう設計要求を、如何に生命が達成することができたのか、**その難問に答えたのが、MacKinnonの仕事です。

もう少し、詳しく書いてみることにします。

生体内のKイオンは、細胞内にあるとき、ほとんどの時間、8個の水分子に囲まれて過ごしています。

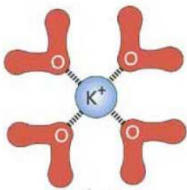
その水分子も、ゆるーい、「水素結合」で、Kイオンを囲んでいるだけ。



紫がKイオン

赤は水分子の酸素原子(全部で8個あります。上4つ下4つ)

(黄色い点線が、ゆるい静電気で水分子がKイオンを取り囲んでいるということ)



上から見下ろすと、左図のような感じ。

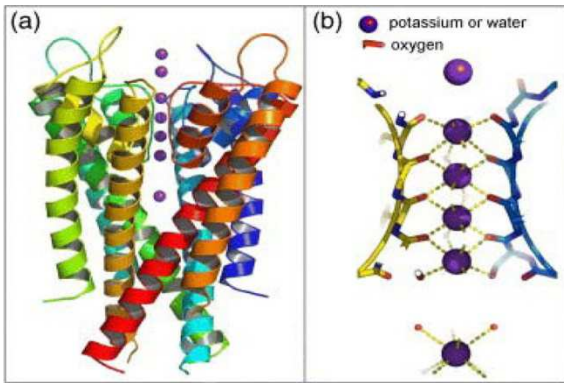
(他サイトからの転用に手を加えました)

一方、KイオンがK-channelを通過するときの挙動に関して。

Kイオンは、抵抗ゼロ、時間ゼロで通過していく。なぜか？ K-channelの開閉部、イオン選択部にあるアミノ酸の3次元構造上でのチャージが、8個の自由水分子にKイオンが囲まれていたときと**全く同じ配列**だから。

Kイオンにしても、何にしても、イオンチャンネルを通過する際に、それまでまとっていた、自由水分子を「脱ぎ捨てて」、イオンチャンネルの構成アミノ酸残基側鎖のチャージを「身にまとう」ことになっています。

だから、この、イオンチャンネルの構成アミノ酸のチャージのピッチが、完璧に、自由水分子のピッチと一致していないとまずいわけです。



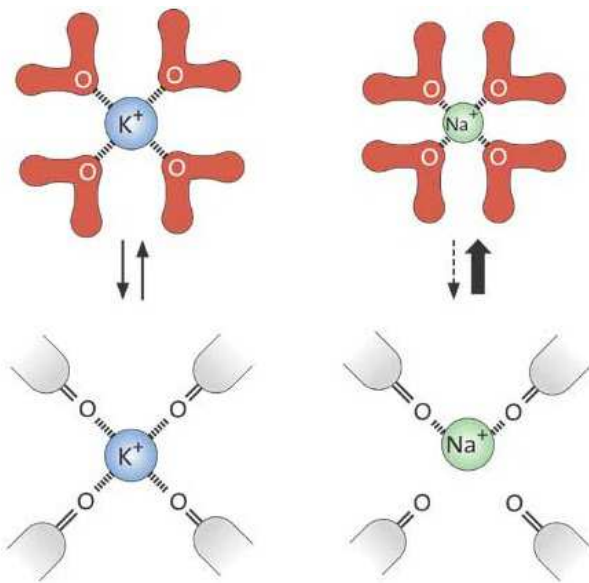
右側の図で、Kイオンを取り囲むアミノ酸のチャージ(赤色と黄色の点線)が、水分子のピッチと同じだという点に注目してください。

Ziad Ganim et al 2011 New J. Phys. 13 113030 doi:10.1088/1367-2630/13/11/113030

(他サイトからの転用です)

では、よりサイズの小さい、Na イオンは、この K チャンネルをくぐるのだろうか？

Na イオンの自由水分子の配列を比較してみましょう。先ほどと同じように、上から見た図です。



(他サイトからの転用です)

ごらんのように、ピッチが違います。

これが、Na イオンが、サイズが小さいにも関わらず、K チャンネルを絶対にくぐる事の出来ない理由です。

実際に、無理に Na イオンと K チャンネルを混ぜて、その3次元構造をしらべると、イオンチャンネルが「虚脱」して潰れてしまうという結果が分かっています。

まあ、この辺は、英語に自信のあるかたは、実際の MacKinnon 先生のレクチャーを視聴してみてください。生命体分子の面白さに、感動すること請け合いです。<http://www.nobelprize.org/mediaplayer/index.php?id=550>

では、問題のセシウムはどうでしょうか。

もう、予想のついている方も多とは思いますが、それは、後ほど述べます。

<<次は、K チャンネルから見たときの、K イオンと Cs イオンの決定的な違いについて>>

さて、基本事項をある程度確認した段階で、放射性カリウム(K40)と、放射性セシウム(Cs134/137)の違いについて、話を戻してみよう。
説明したいテーマは、**K40=無害、Cs134/137=有害、というインパクトの差が生じ得る可能性に関する議論**です。

<<K40 が β 崩壊を起こす際のことを考えてみる>>

言うまでも無く、K40 の β 崩壊は $K40 \rightarrow Ca40 + e^- + \nu^-$

まずは、細胞質内で起こったら、という思考実験。

前のページに述べたように、自由水に緩く囲まれた、この「緩い」状態では、おそらく、崩壊時に「反跳」でエネルギーを獲得しても熱エネルギーとして消費し、あまり効率よく他分子に影響を与えることもなく、効率的に水分子を電離することもないだろうが、たとえ、低い確率で水分子を電離してラジカル生成しても、細胞内には SOD という無毒化酵素がたんまりあるので、すぐに無毒化されるはず。たぶん、生体内にある K40 の量程度では、まったく細胞はダメージを受けない。

一方、K チャネル通過時に崩壊が起こったときの思考実験。

いってみれば、自由水分子に囲まれているのと同じような「ゆるい」状態の K40 イオンが、イオンチャネル通過時に 崩壊を起こしても、やはり、反跳にエネルギーを消費して、K40 原子が Ca40 に変化したところで、K-channel に与える影響はごく少ないだろう、と予想できる。
あ、そうそう、ちょっと違和感を覚えられる議論だと思うので、説明を補足しておきます。

もう一度確認しますが、K40 の β 崩壊は $K40 \rightarrow Ca40 + e^- + \nu^-$ ですね。

生成する e⁻ や ν⁻ の方ばかり見ると、これがどこに飛んで行こうが、飛んでいく先の相手分子・原子に与える影響なんて、一旦 e⁻ や γ が生成した時点で、どの核種も(K40 も Cs134/137 も)同じだろとなりますよね。

(これが、従来の考え方です)

でも、ここここでは、残された K40(Ca40)のことに、注目しながら、議論をしていってみたいとおもいます。

Cs の例を挙げるときに、もうすこし詳しく議論してみます。

話を、Cs に切り替えましょう。

<<K チャネルは Cs イオンに対して、全く別の認識をする>>

語弊はありますが、Cs って、食物連鎖的には、ほぼ無視していい元素です。言ってみれば、希少元素なんです。だから、哺乳類には Cs チャネルというのは存在しない。神様が設計する必要を感じなかったからです。

じゃあ、生命体細胞は Cs イオンを取り込まない、となってくれりゃ、原発事故の心配事も少なくてすむんですが、残念ながら、(乱暴な言い方をすると)K イオンと誤認識されて、細胞内に取り込まれてしまうんですね。

この時に、Kチャネル(など)が関与する、と考えられています。(実際には取り込みは、「ポンプ」と呼ばれるの分子が主因と考えられています
が)

ところで、K イオンと Cs イオンが K チャネルを通過するときに、決定的に異なる、あるひとつのパラメータがあります。

通過時間です。

上に書いたように、K イオンは、ほぼ時間ゼロで K チャネルを通過するが、Cs イオンは、通過時間がめっちゃめっちゃ長いんです(ref)。**嵌り込んでロτζする**、と言ってもいいくらいです。ちなみに、Cs イオンがロτζする生命体分子は、K チャネル系分子だけだ、と考えられています。

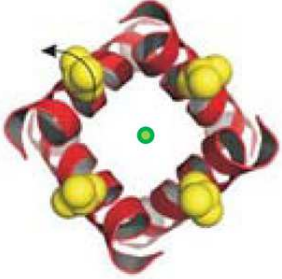
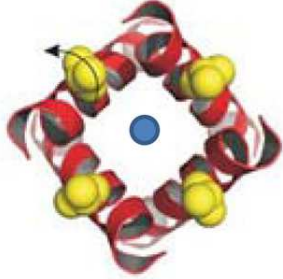
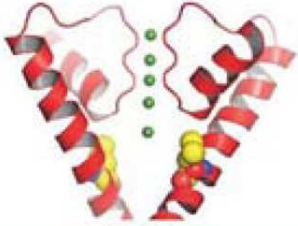
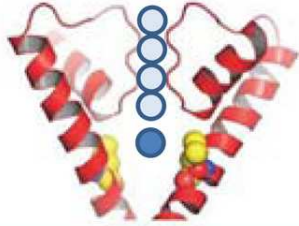
少し、詳しく補足してみましょう。

細胞質内にフリーで浮いているときの Cs イオンが自由水和水に囲まれているのは K イオンと同じです。

前に書いたように、K イオンにしても何にしても、チャンネルをくぐろうとすると、この自由水和水を「脱ぎ捨てて」、代わりにチャンネル構成アミノ酸残基側鎖のチャージを「身に纏う」ことになっています。だから、フリーのイオンの状態での水和水の配列と、イオンチャンネルのアミノ酸のチャージの配列が、完璧にマッチしていないとマズイ、というのは説明しましたね。(Na イオンが、サイズが小さいにも関わらず、絶対に K チャンネルをくぐれない理由です)

さて、Cs イオンの問題は、K-channel の開閉部をくぐろうとしたとき、その水和水の空間配列のピッチが、K イオンのそれとは、かなり異なるわけで、だから、「嵌まり込んで」、堅くロジジしてしまう。

Cs イオンは K チャンネルに、長時間、「堅く嵌り込んで」そこに居座り続けることになる。

Kチャンネルから見たときのKイオンとCsイオンの違いの概念図		
	● Kイオン	● Csイオン
Kチャンネルを上から見た図		
Kチャンネルの断面図		
イオン通過時間	ゼロ	めっちゃ長い
通過時の周囲アミノ酸の緩さ	ユルユル。自由水に囲まれているのと変わらない。	ガチガチに堅く嵌り込んでいる

(他サイトからの転用・改変です)

次に考えるべきテーマは、もうお分かりとおもいますが、

<K チャンネルに「堅く嵌り込んだ」状態で、Cs134/137 が崩壊を起こしたら、どうなるか>

<Kチャンネルに「堅く嵌まり込んだ」状態で、Cs134/137 が崩壊を起こしたら、どうなるか>

Cs が、K チャンネル内で β 崩壊を起こしたときのことを議論してみたいと思います。

が、ちょっと疲れてきたので、映画の話でもしましょう。

「アルマゲドン」って映画を、見たことある人はいるでしょうか？小惑星が地球に衝突するのを回避しようと、アメリカのヒーローたちが頑張っちゃう映画です。



(他サイトからの転用です)

ヒーローたちが、小惑星を破壊するとき、表面ではなく、地中に穴を掘って爆弾を炸裂させたわけですが、あのときの議論にも出てくるんですが、爆竹を手のひらの上で爆発させても、かすり傷一つ負わない。でも、こぶしを堅く握り締めて、その中で爆竹を爆発させると、手が重症を負ってしまう、ということ。



(他サイトからの転用です)

わざわざ、石油掘削人をかき集めて、スペースシャトルを飛ばして、危険な小惑星に降り立って、地面に穴を掘ったのは、実は、そういうことだったんです。奥が深いですね。

さて、セシウムとカリウムチャンネルの話に戻りましょう。

Cs イオンは、K チャンネルの内部(注)に、堅くはまり込んで、長時間居座っているんじゃないよね？

火薬の爆発と、原子核崩壊を同列に扱うことは、一種のミスリードだと思うけれど、上記のメスバウアー効果のことを思い起こしてあげれば、「堅く足場に固定されたとき」の、原子核崩壊が、古典的な原子核物理の理論の延長線上には留まらない、興味深い挙動につながるということくらいは、予想できるでしょう。

話は変わりますが、オワンクラゲの GFP の話をして見ましょう。

下村脩先生が、GFP(緑色蛍光タンパク)を見つけたとき、イクオリンとGFPがFRET(フェルスター型蛍光エネルギー転移)を起こすんじゃないかと睨んで、混ぜてみたんだけど、最初の実験では、ウンともスンともいわなかった。

でも彼はそこで、すこし深く洞察し、エネルギー伝達の足場として、DEAE-dextran 何かを加えたんだよね。すると、もの見事に、FRET が起こった。あれなんかも見方を変えれば、足場固定がエネルギー伝達での非線形性の創出に大事だ、といういい例とも見ることができる。

なぜオワンクラゲは緑色に光る？
(2つの大事なタンパク:イクオリンとGFP)

最初の実験:フリーの溶液中では、エネルギー転移は起こらず、観察されるのはイクオリンの青色。GFPの緑色蛍光は出ない。

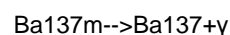
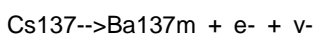
改良実験:デキストランを加えると、Foerster型蛍光エネルギー転移(FRET)が起こり、GFPの緑色蛍光が観察される。FRETにも足場が大事。

(まあ、局所濃度の上昇、という説明をする人もいるのですけれどね)

(他サイトからの転用に手を加え作成しました)

実は、 γ 線の話のメスバウアー効果と、この、蛍光のエネルギーの伝達って、面白い関係にあって、メスバウアー自身も、メスバウアー効果の発見の実験の際には、蛍光のメカニズムを、よく、引き合いに出していたそうです。前者は、原子核の共鳴現象、後者は、電子雲の共鳴現象、と考えれば、その類似性に、先達も気が付いていたのですね。

さて、Cs と K チャンネルの話に戻りましょう。言うまでも無く、



ですよ。普通の、まともな人間、まともな学者は、 e^- や γ のことだけを論じます。教科書に書いてあるとおりです。

でも、私なんかは、残された Ba の状態を見てあげたいなあ、と思うわけです。

e^- の放出時の反跳で運動エネルギー(熱振動)も獲得してるし、 γ 線も放出する(メスバウアーを思い出して)。

ちょっと危ない極論をすると、

1. Cs+ --> Ba++ に変わったとき、本来の水和水の配置とその結合の強さが当然変わるだろうから、その変化が、「ガチガチにはまり込んだKチャンネルの開閉部」への化学反応の触媒的役割になっていないか、という可能性。
2. メスバウアー効果のたとえば正確かどうかは分かりませんが、β崩壊直後にγ崩壊も起こすので、「共鳴」とまでは行かずとも、K-channelの特定部位にエネルギーを効率よく(フリーの空間での作用に比べて)行っている可能性。
3. 足場固定された固体中でのβ崩壊に関しても、メスバウアー効果に似たような、効率よいエネルギー伝達の可能性はあるんじゃないか。等々。

という風に、元素の挙動の違い、というか、生命体分子(この場合はKチャンネル)から見たときの、K40とCs134/137の「見え方の違い」というのを考えると、

冒頭に書いたように、

K40は、一切障害なし。内部被曝にカウントする必要すらない、。

Cs134/137はKチャンネルに与える影響あり。

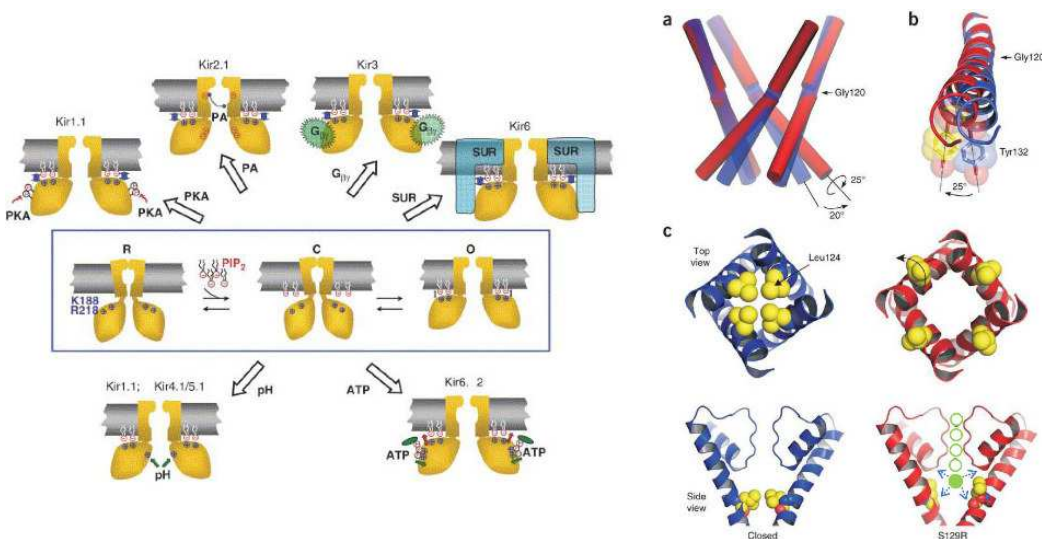
という意見も、一つの可能性としては、考えておかねばならない、と思うわけです。

Kチャンネルの開閉部がガチガチに開かれ、デカイCsイオンに嵌まり込まれ、グリグリと押し広げられたような状態で、崩壊が起こり、何らかの結果として化学反応が促進する。

やはり、崩壊時のイベントの結果、チャンネルがopenな状態に固定されるようなモデルは、想定してもいいんじゃないかなあ。

どんな化学反応になるのか、、、さすがに、化学に詳しくないんで、ちょっと予想が付かないけれど。

不安定なCs/Baが触媒みたいに働いて、分子内の可動部のヒンジみたいなところでアミノ酸残基のフリーの側鎖どうして反応が起こるとかでしょかね。



まあ、左図のように、Kチャンネルと言っても、いろんなタイプがあり、いろんなメカニズムでオープン・クローズを繰り返しているわけですが、たとえば、ある種のKチャンネルは、右の図のように、開口部の部分にある、ロイシンというアミノ酸の向きで、開閉が制御されます。たとえば、この部分に、放射性セシウムが堅くはまり込んだ状態で崩壊を起こし、その崩壊エネルギーが、非放出・非反跳に近い状態で(メスバウアー共鳴に類似の様式で)、効率よく、相手分子にエネルギー伝達されれば、このロイシンなどのような部分が、オープン状態に固定される、なんらかの化学反応に、効率よく転換される(言ってみれば、触媒として働く)可能性、というのを考えています。

(他サイトからの転用に手を加え作成しました)

以上をまとめると、ごく微量のセシウム内部被曝で、ごく微量の、ある種のカリウムチャンネルが、オープン形で壊れる、というモデルを可能性としては想定しておくべき、というのが結論です。

次に議論するのは、では、いったい、その極微量のカリウムチャンネルの異常で、心臓の伝道系に問題を来たしうるのか？というのが、テーマです。