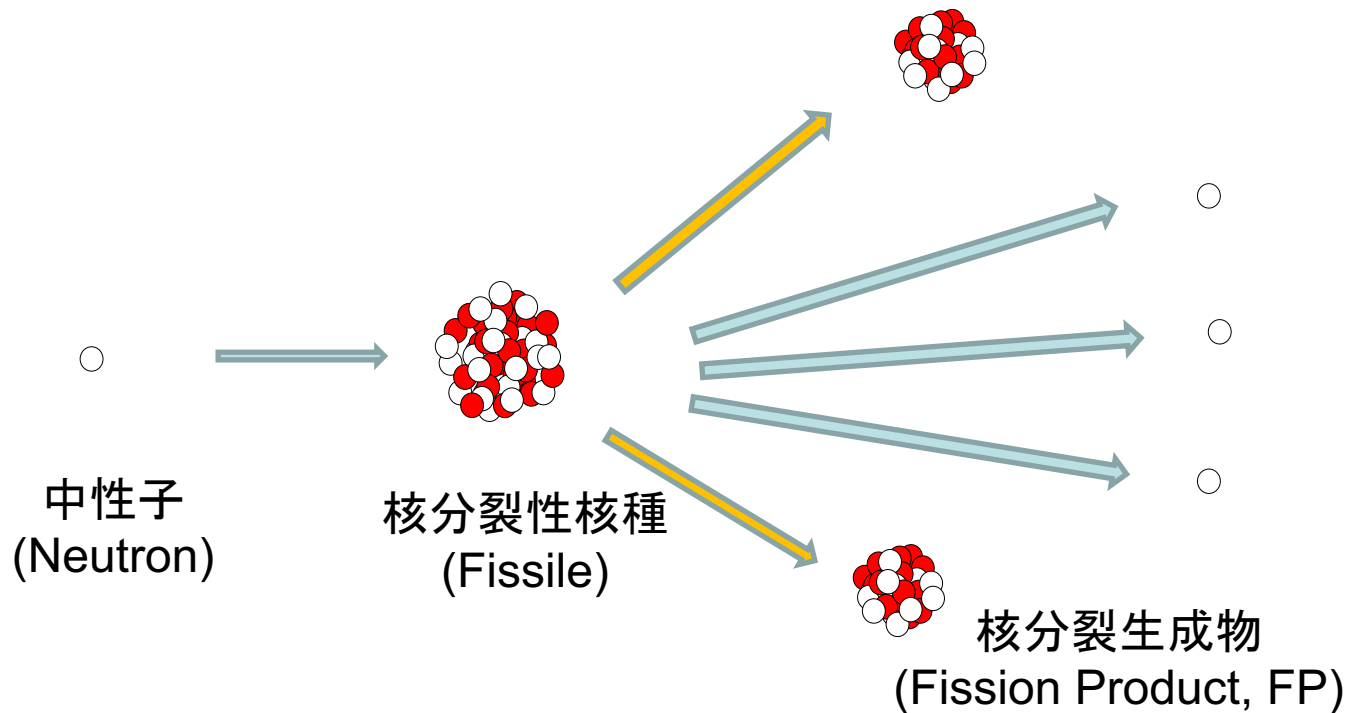


やさしい臨界の話

- 核分裂と中性子増倍率
- 未臨界体系の中性子数
- 臨界と遅発中性子

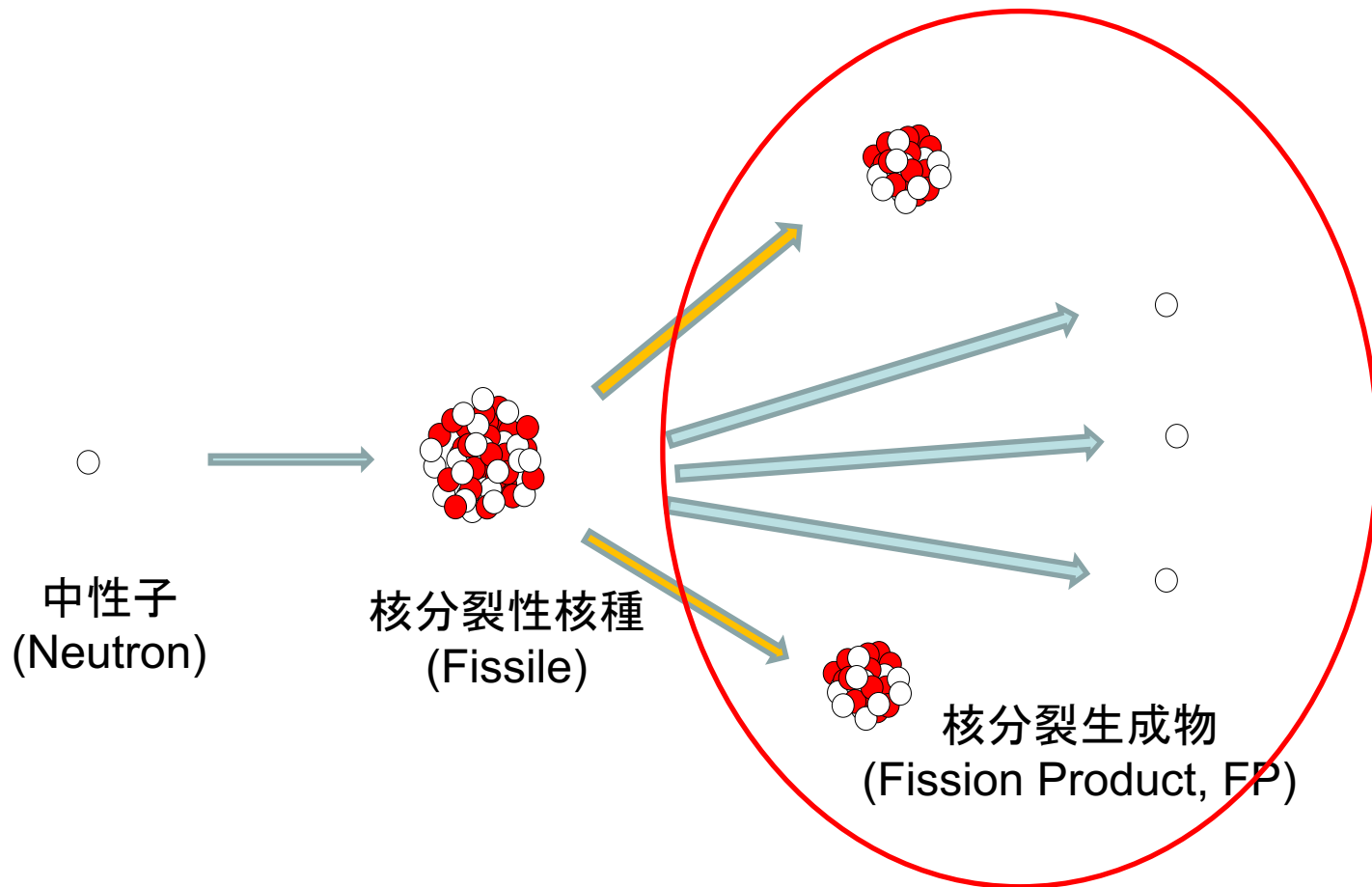
核分裂と中性子増倍率

核分裂



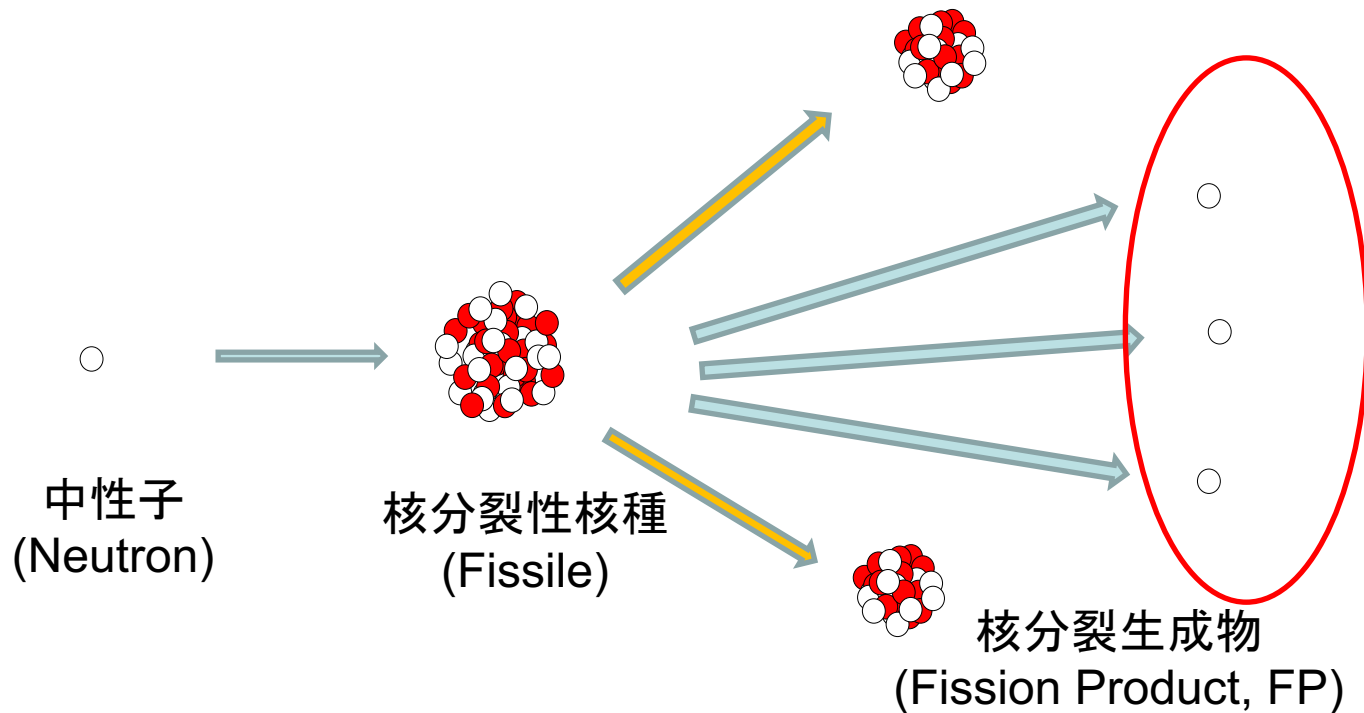
ある特定の重い原子核(ウラン等)に中性子が衝突すると、高い確率で核分裂反応が起こり、エネルギーが放出される。

核分裂



核分裂反応によって、2～3個の中性子が発生する。

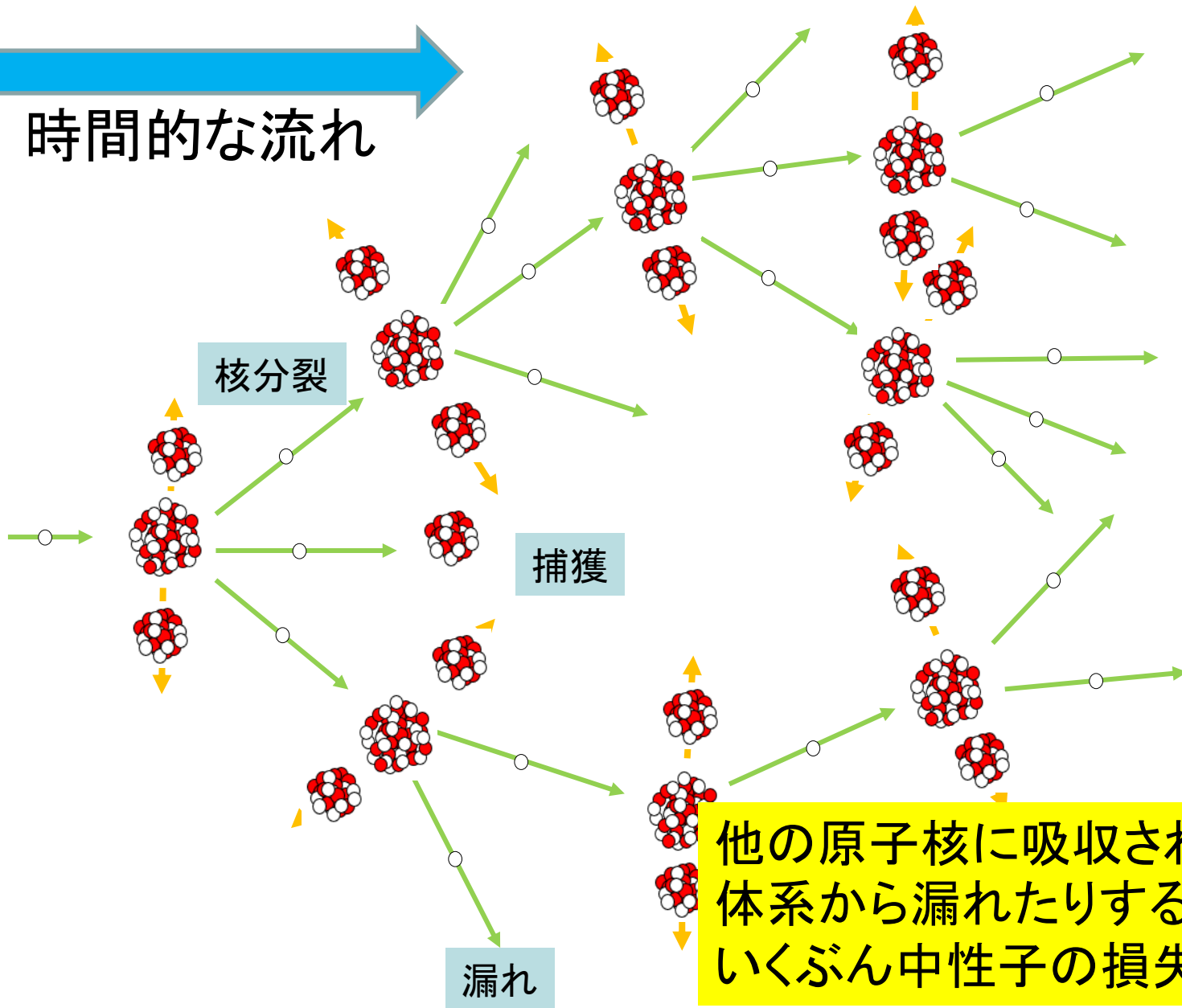
核分裂



核分裂反応により発生する中性子で
また核分裂させれば、連鎖的に核分裂が
起こって、エネルギーを取り出せるのでは！

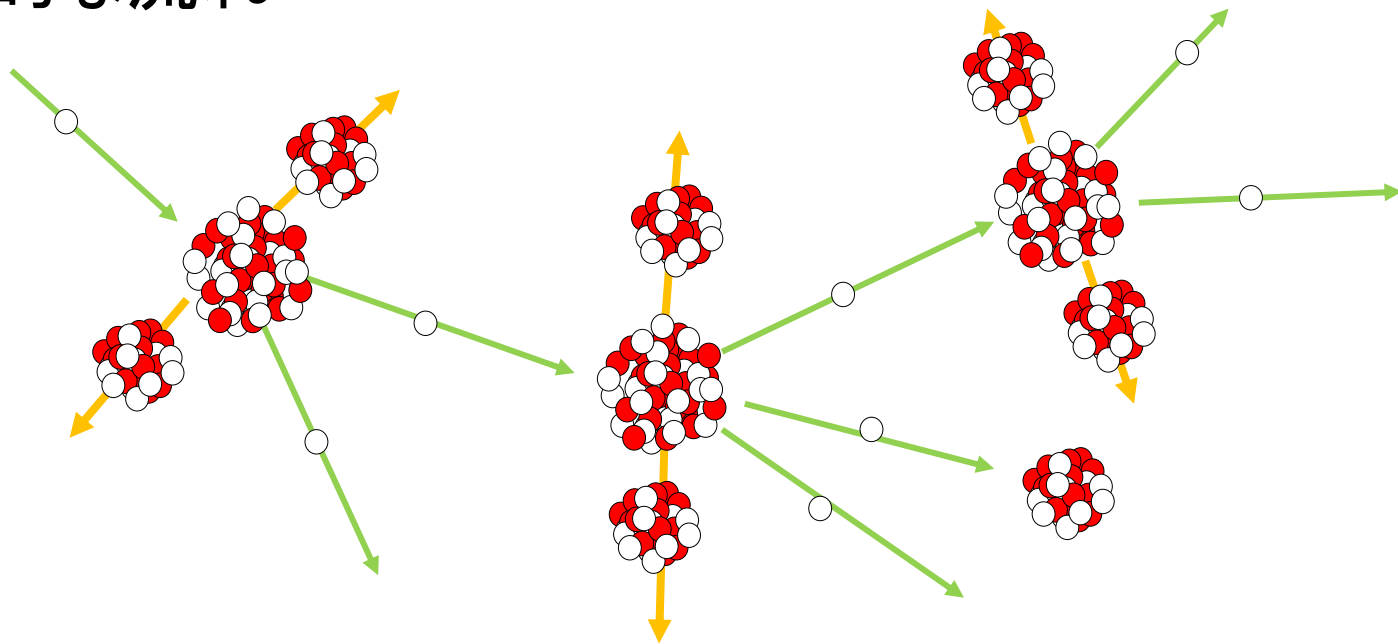
核分裂連鎖反応

時間的な流れ



核分裂連鎖反応

時間的な流れ

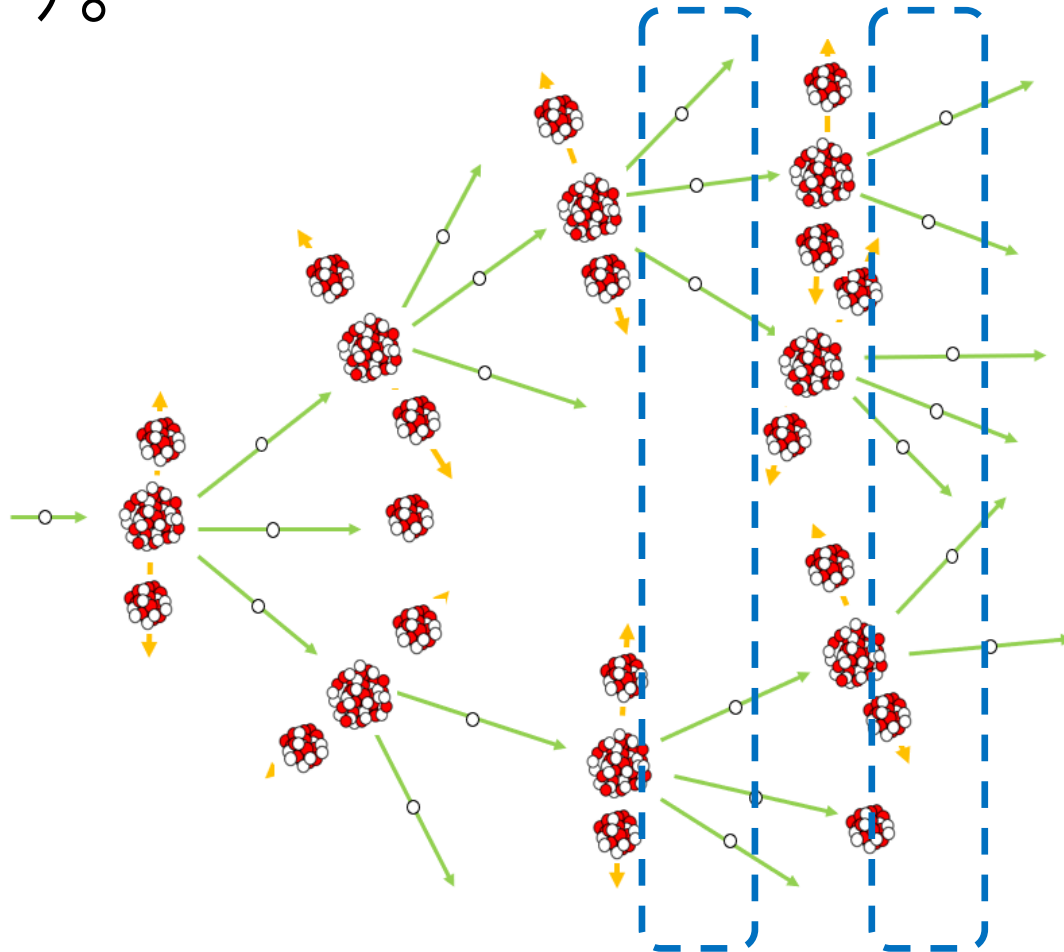


中性子の数(核分裂反応の回数)が
時間とともにほぼ一定である状態を
「臨界状態」と呼びます

(厳密には異なりますが、ここではそう理解して下さい)。

世代

中性子集団が「入れ替わる」時間の長さを「**世代**」と定義する。世代の長さは極めて短い(1~10 μ 秒のオーダー)。

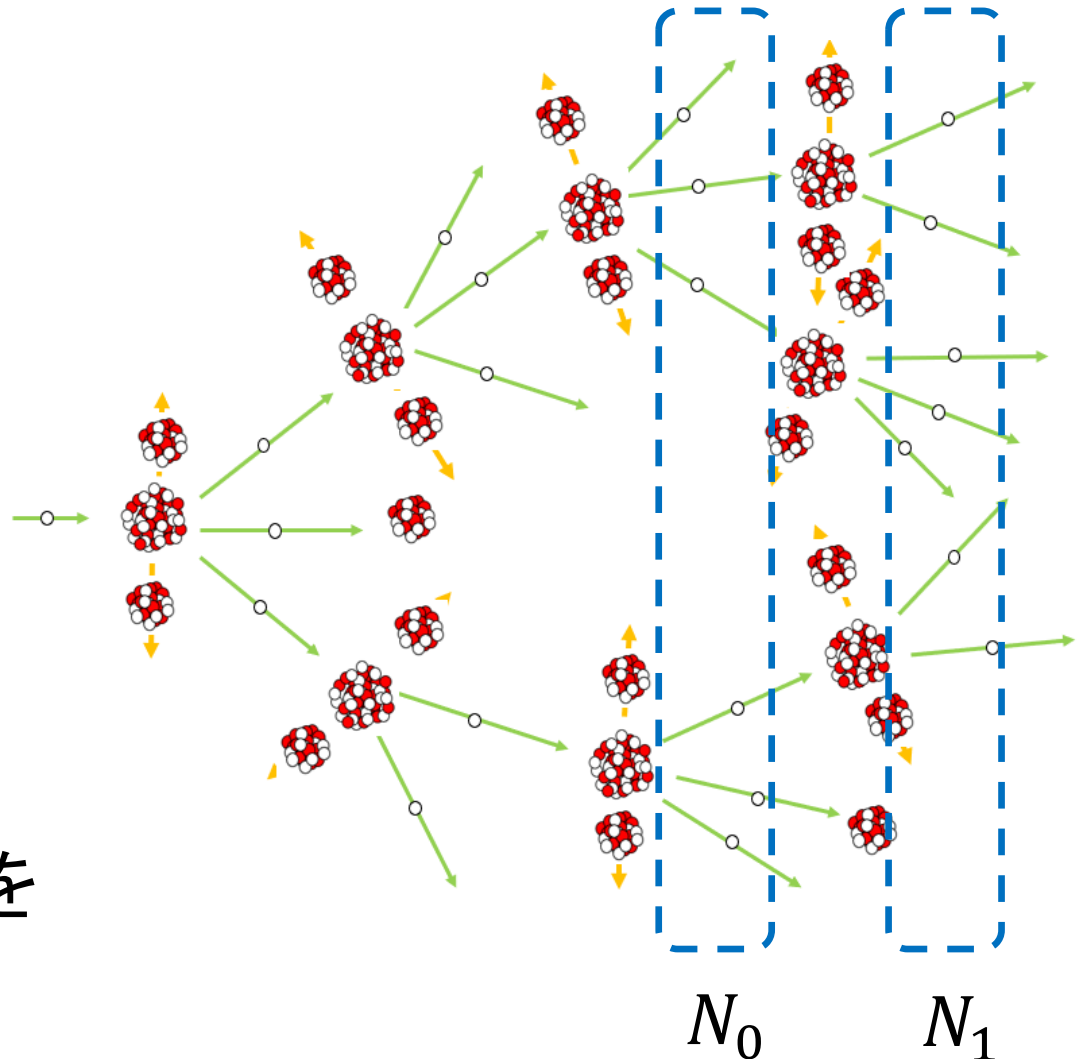


中性子増倍率

連続する世代の中性子数の比を「**中性子増倍率**」 k と定義する:

$$k = \frac{N_1}{N_0}$$

$k = 1$ のとき:**臨界**
原子炉の出力は、
時間とともにほぼ一定を
保つ。

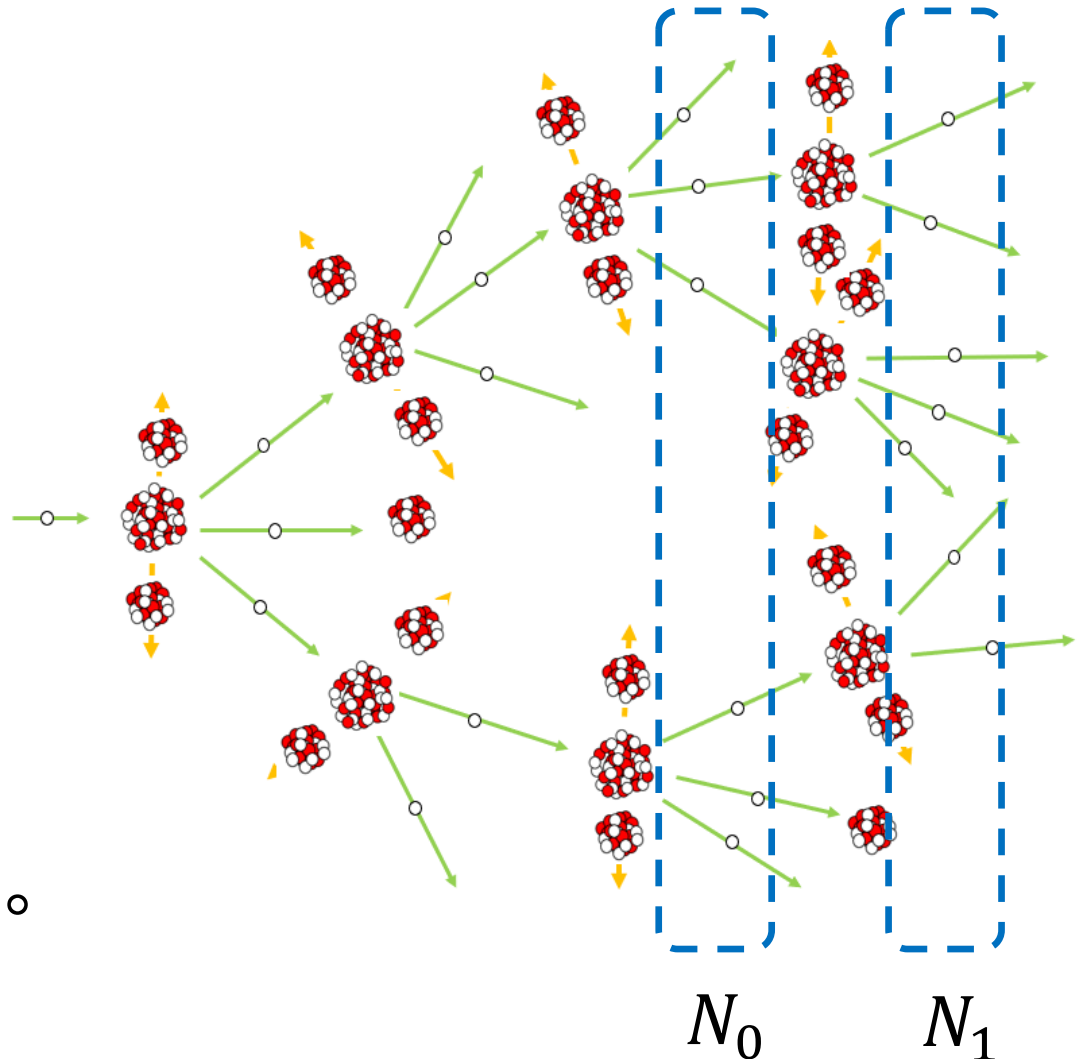


中性子増倍率

連続する世代の中性子数の比を「**中性子増倍率**」 k と定義する:

$$k = \frac{N_1}{N_0}$$

$k > 1$ のとき:**超臨界**
原子炉の出力は、
時間とともに増えていく。

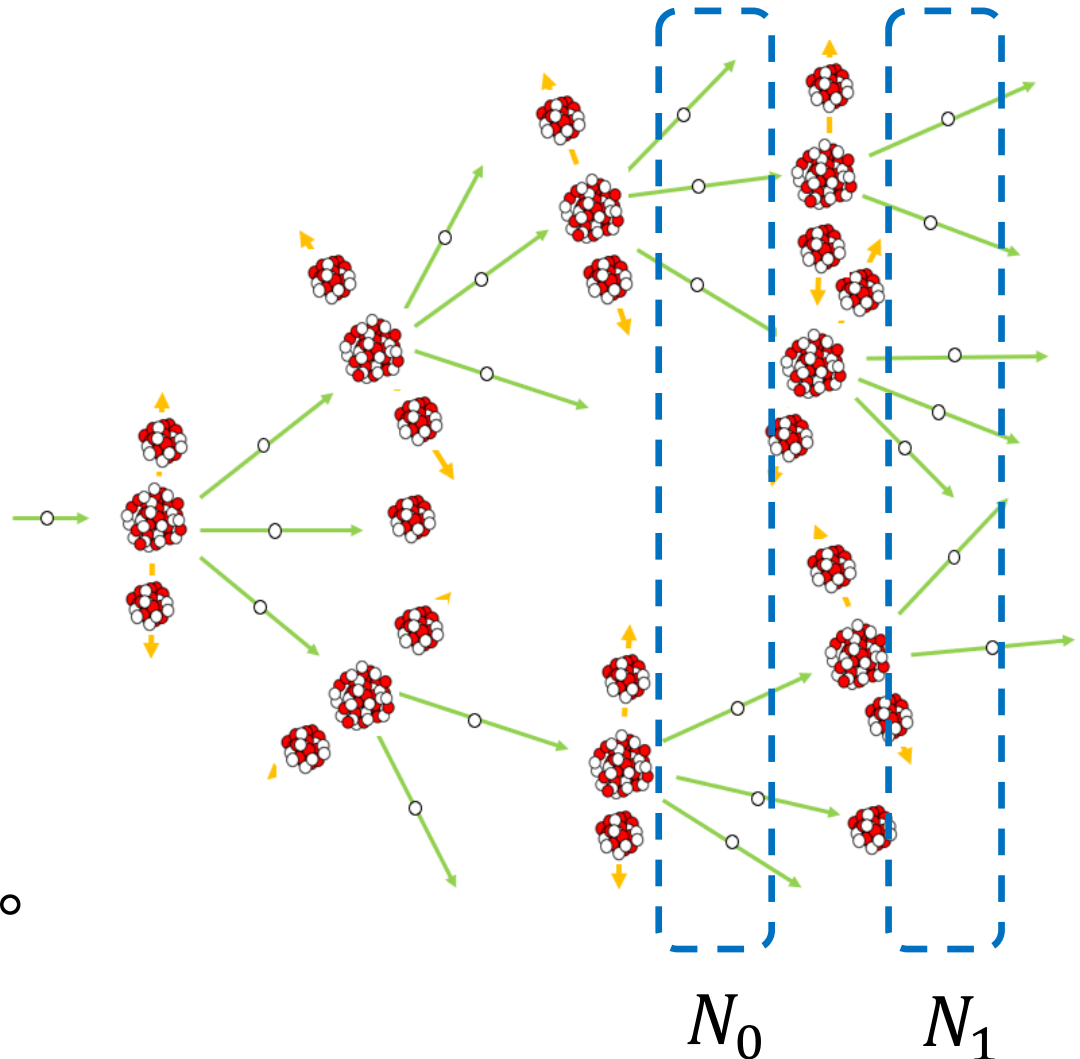


中性子増倍率

連続する世代の中性子数の比を「**中性子増倍率**」 k と定義する:

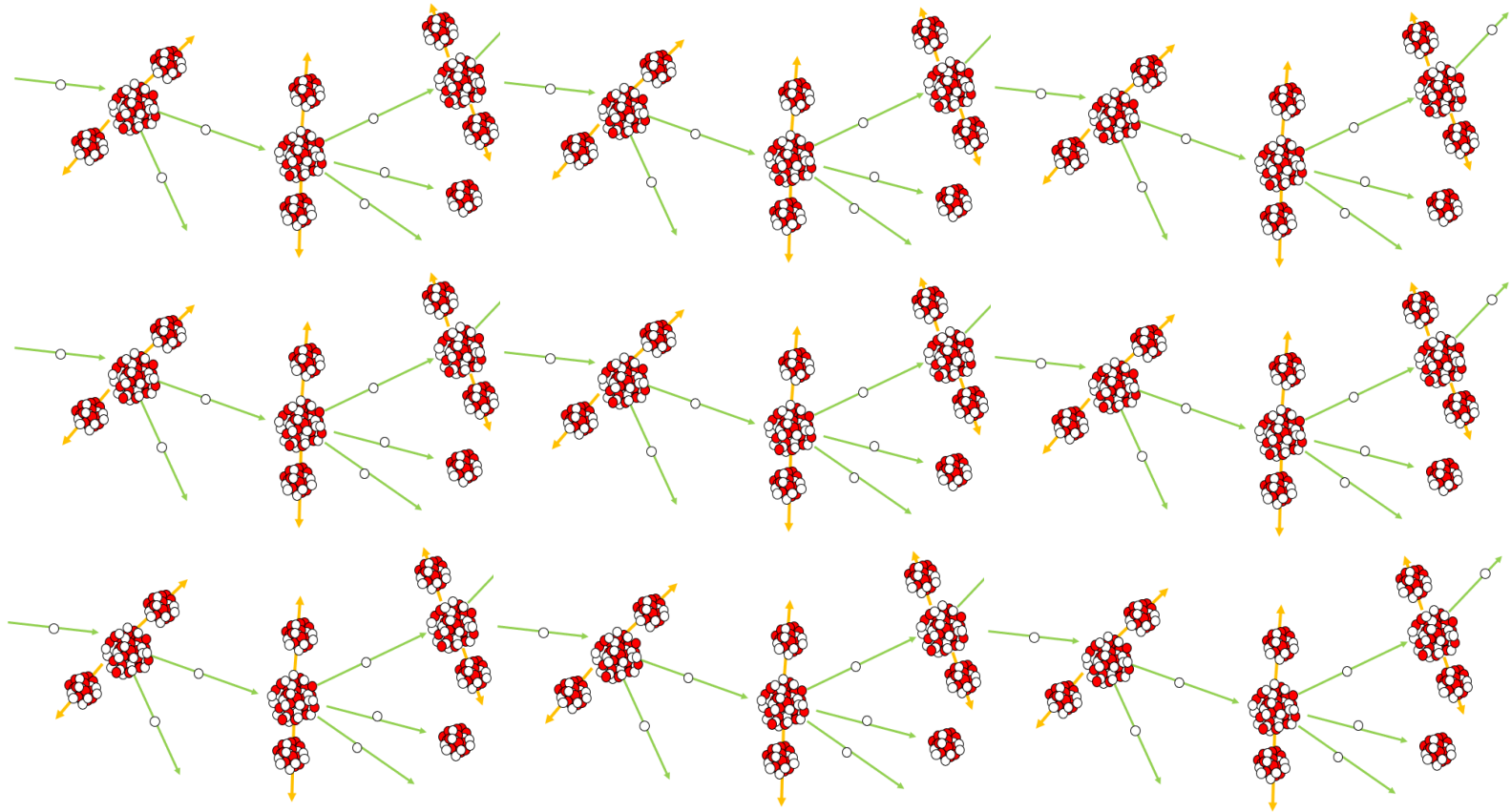
$$k = \frac{N_1}{N_0}$$

$k < 1$ のとき:**未臨界**
原子炉の出力は、
時間とともに減っていく。



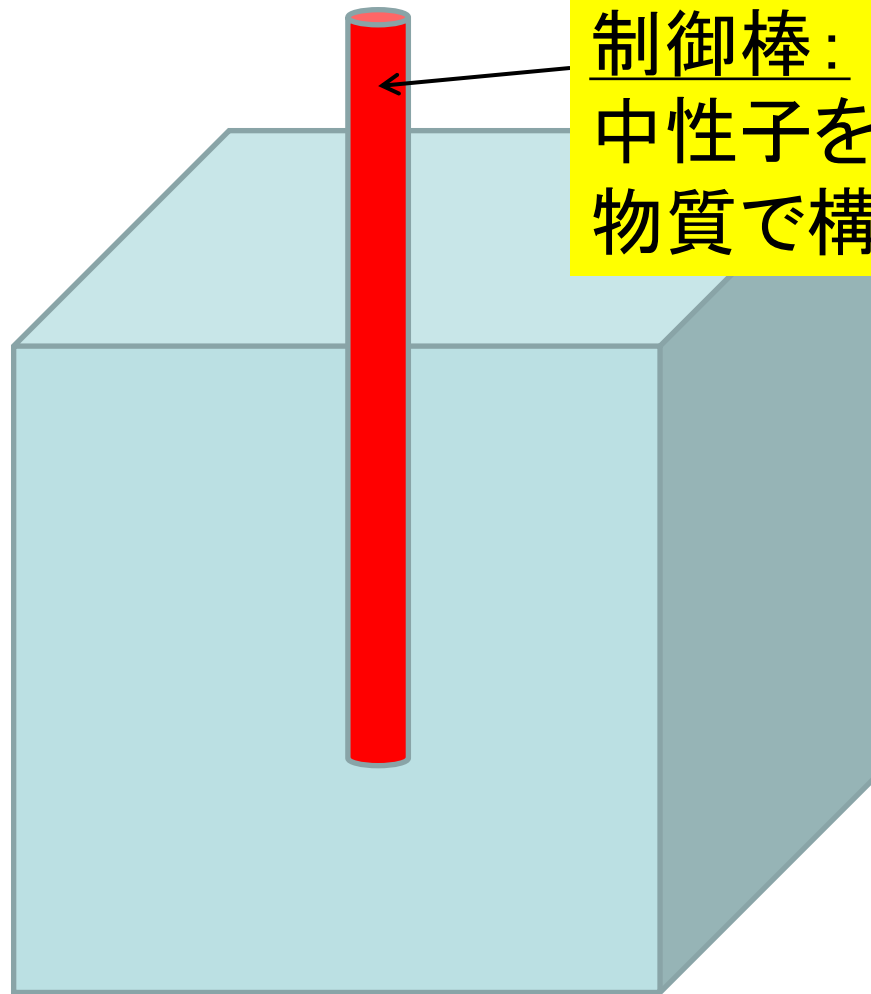
核分裂連鎖反応と原子炉の出力

時間的な流れ

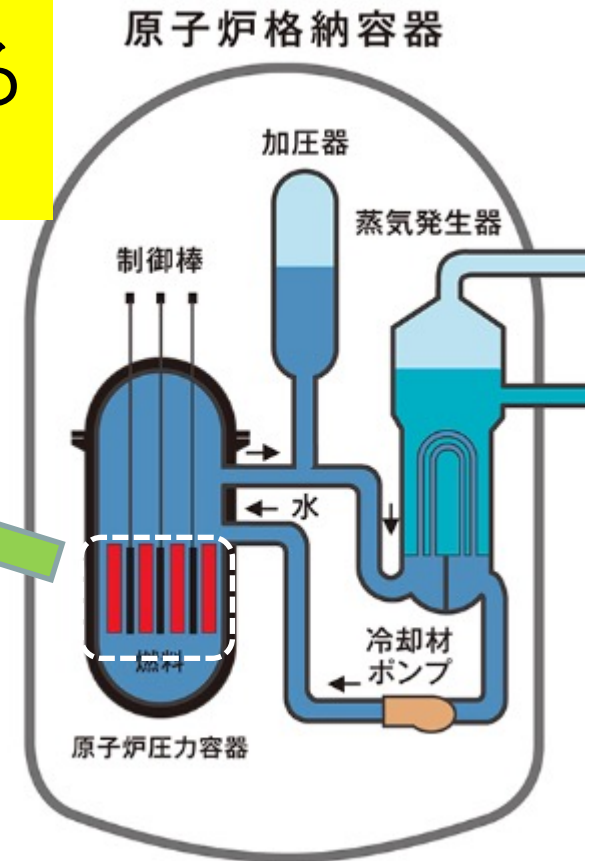
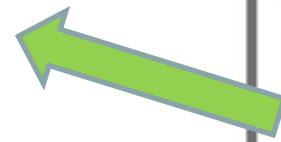


中性子の数が多い＝核分裂反応の起こる数が多い
＝より多くのエネルギーが発生＝原子力発電所の出力が大

原子力発電所の運転



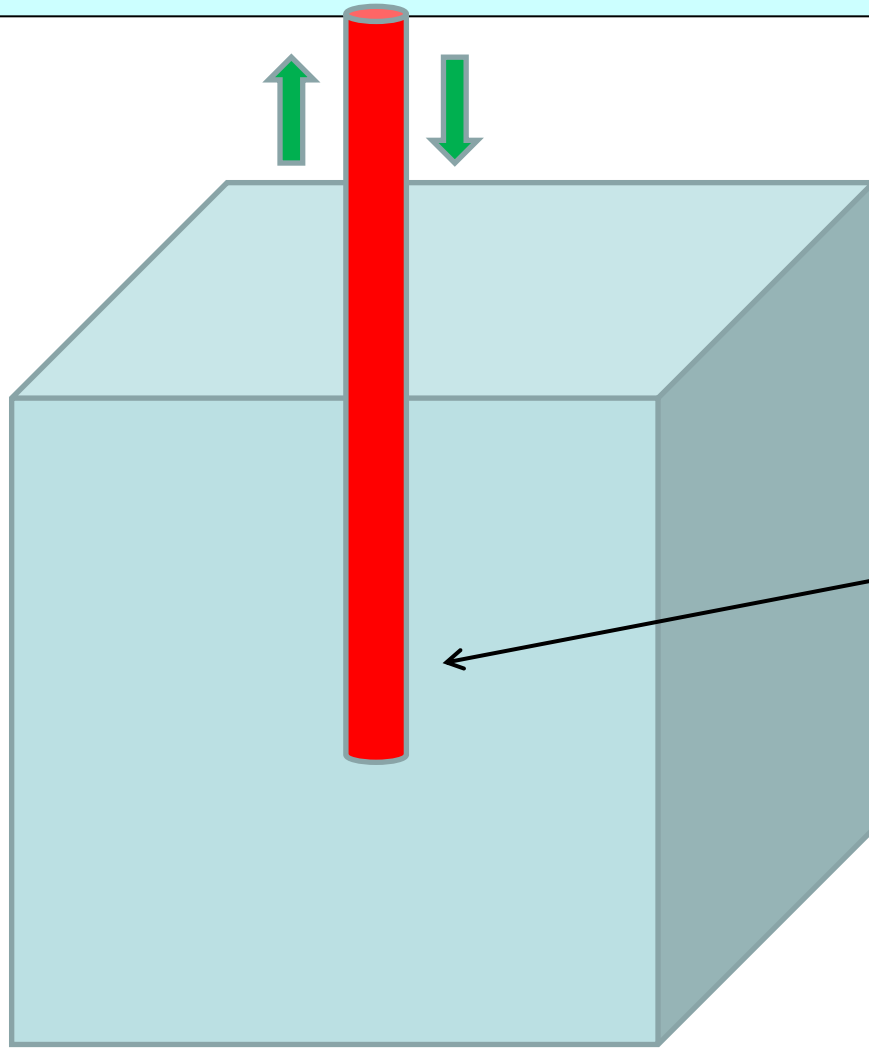
制御棒：
中性子を吸収する
物質で構成



出典：日本原子力文化財団
「原子力・エネルギー図面集」

原子力発電所が発生するエネルギー(出力)を調節するために、中性子増倍率を変化させる。

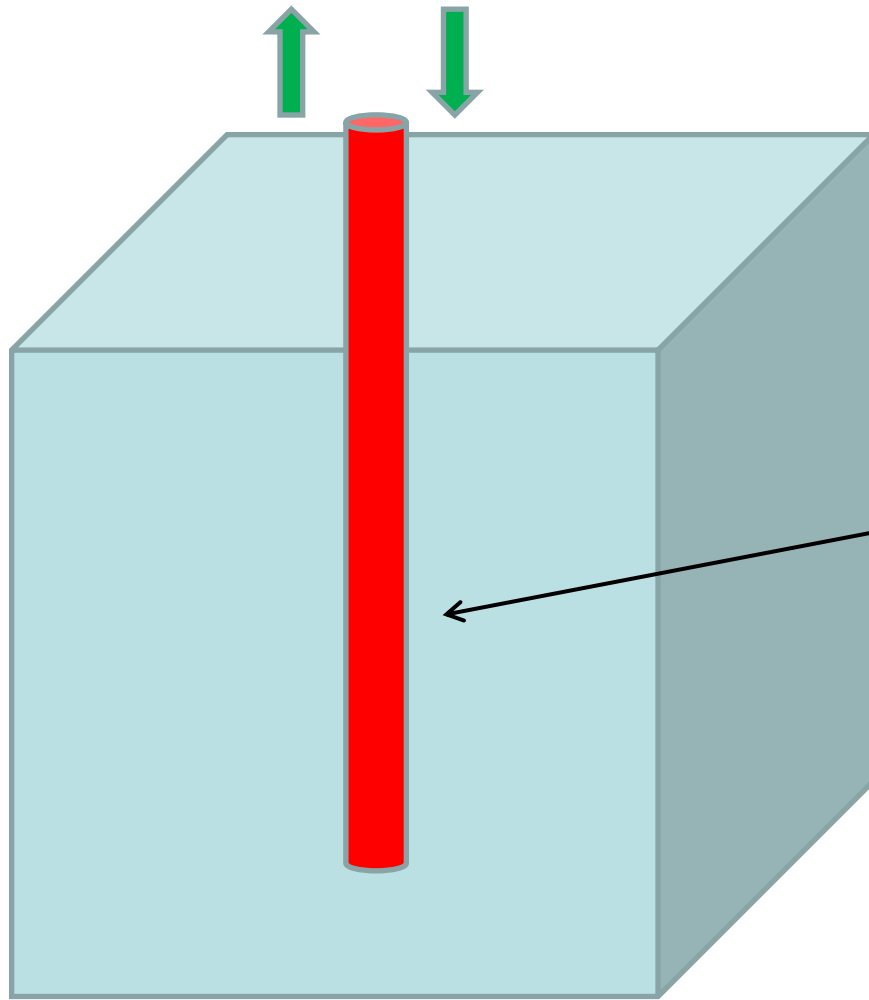
原子力発電所の運転



制御棒をいったん
引き抜いて、
再度同じ位置に戻す。

出力を増やしたいときは、いったん体系を「超臨界」にして、中性子の存在量を大きくし、また臨界に戻す。

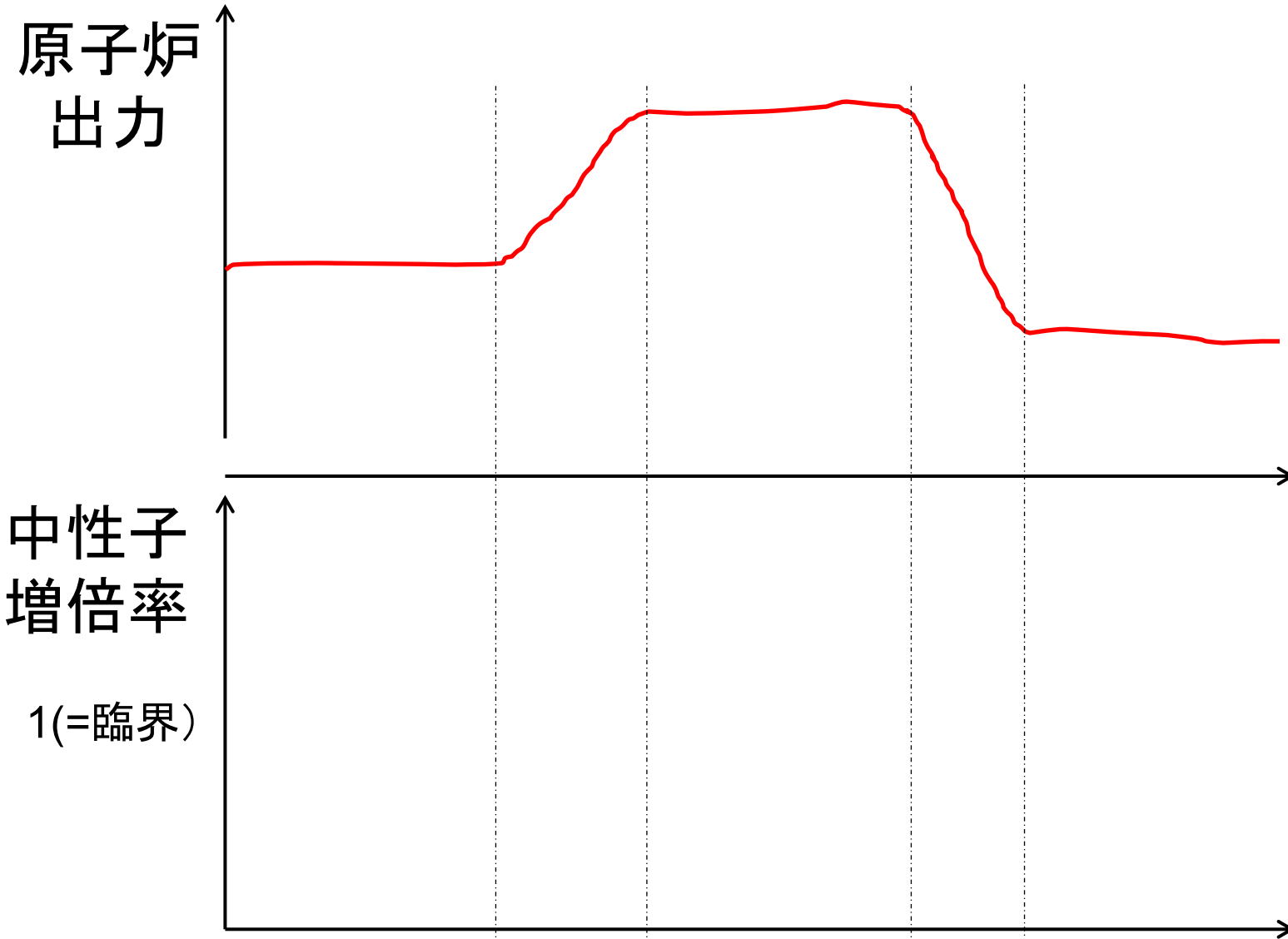
原子力発電所の運転



制御棒をいったん
挿入して、
再度同じ位置に戻す。

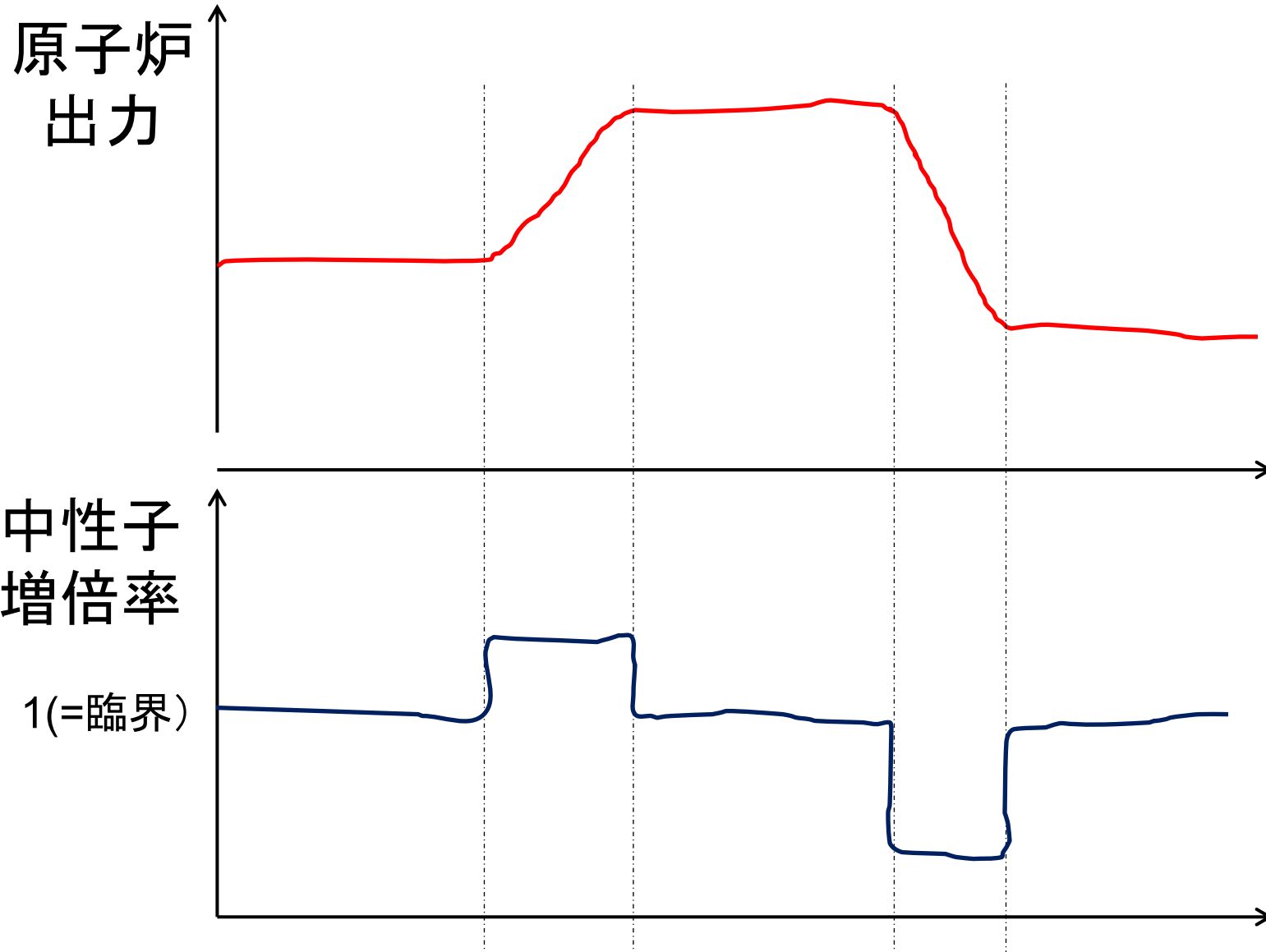
出力を減らしたいときは、いったん体系を「未臨界」にして、中性子の存在量を減らし、また臨界に戻す。

中性子増倍率と出力の関係(模式図)



上のような出力で原子炉を運転する場合、中性子増倍率をどのように変化させればよいかイメージしよう。

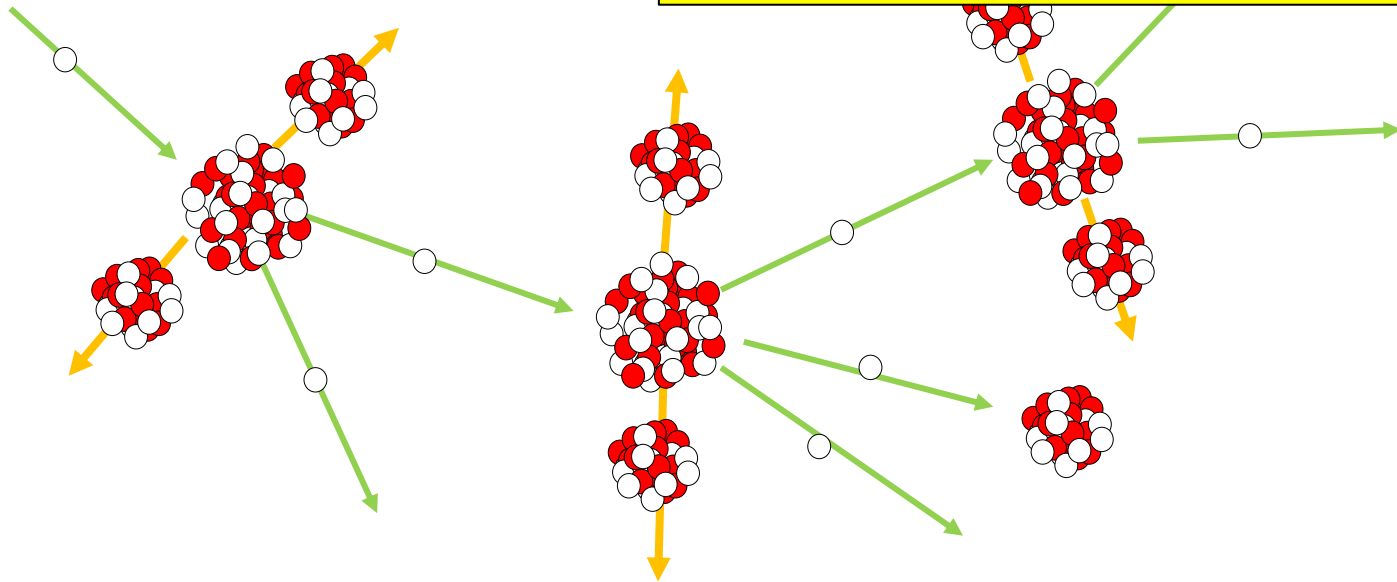
中性子増倍率と出力の関係(模式図)



核分裂連鎖反応

「臨界」とは極めて単純な物理現象なのか？

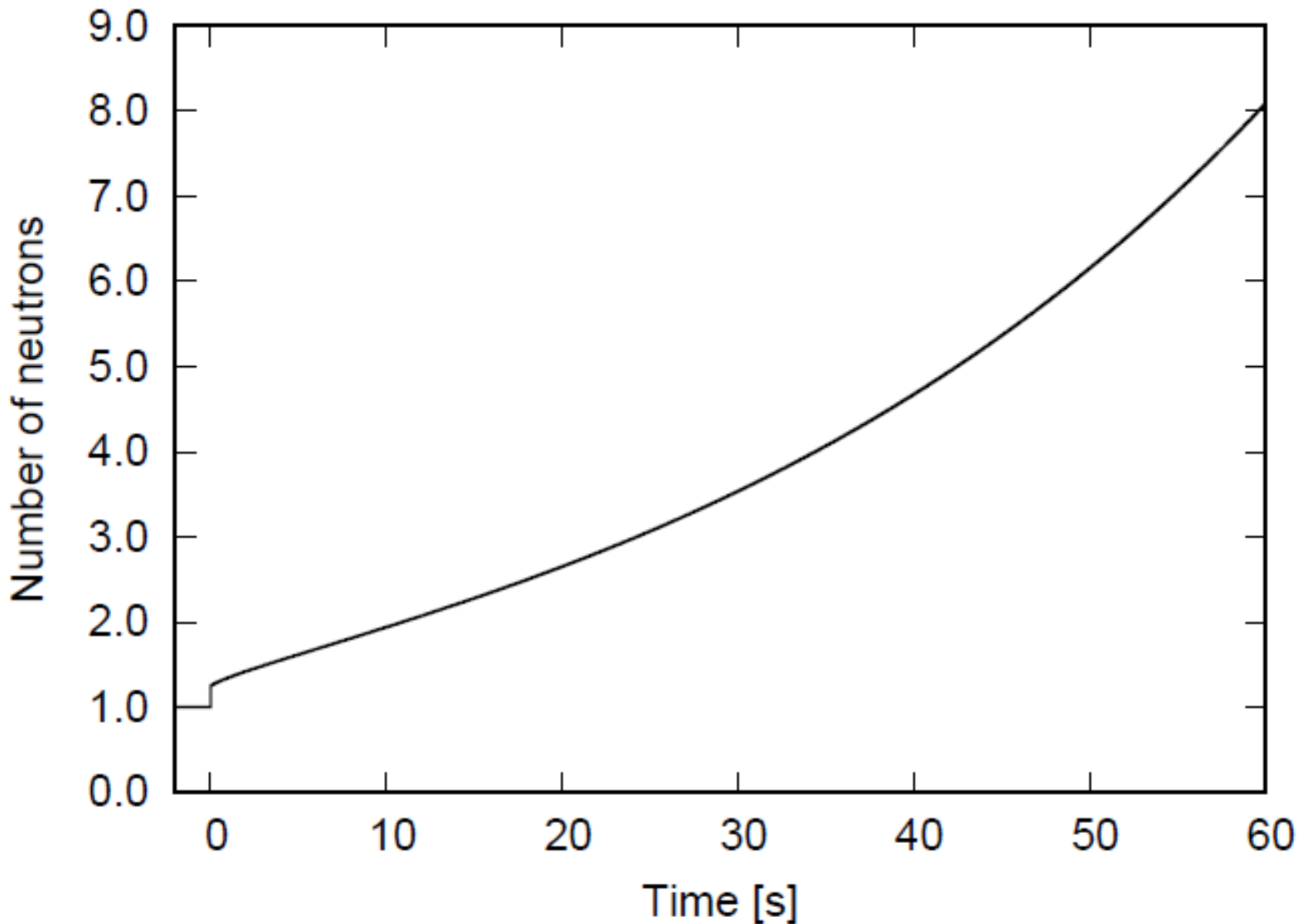
時間的な流れ



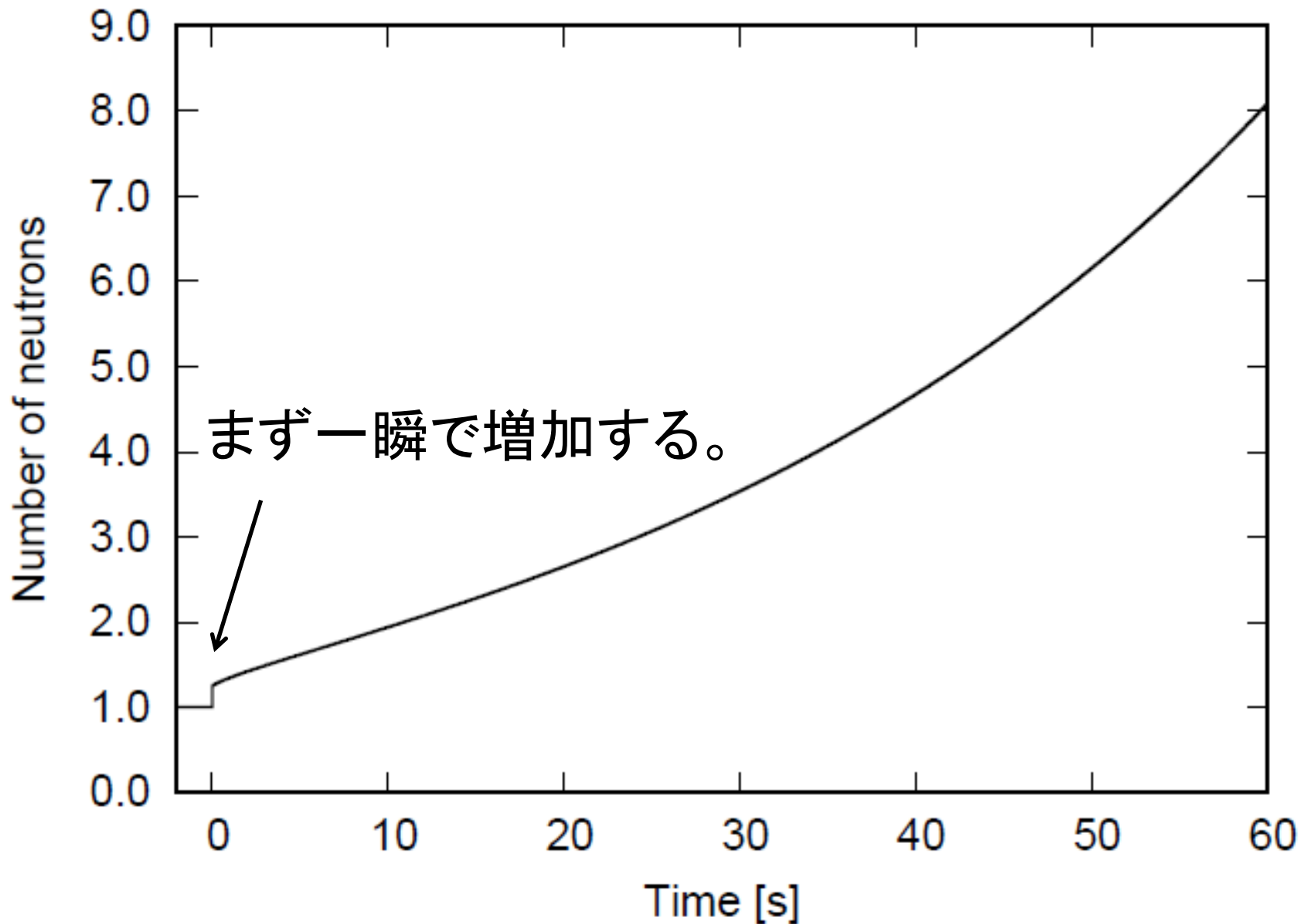
中性子の数(核分裂反応の回数)が時間とともにほぼ一定である状態を「臨界状態」と呼びます

(厳密には異なりますが、ここではそう理解して下さい)。

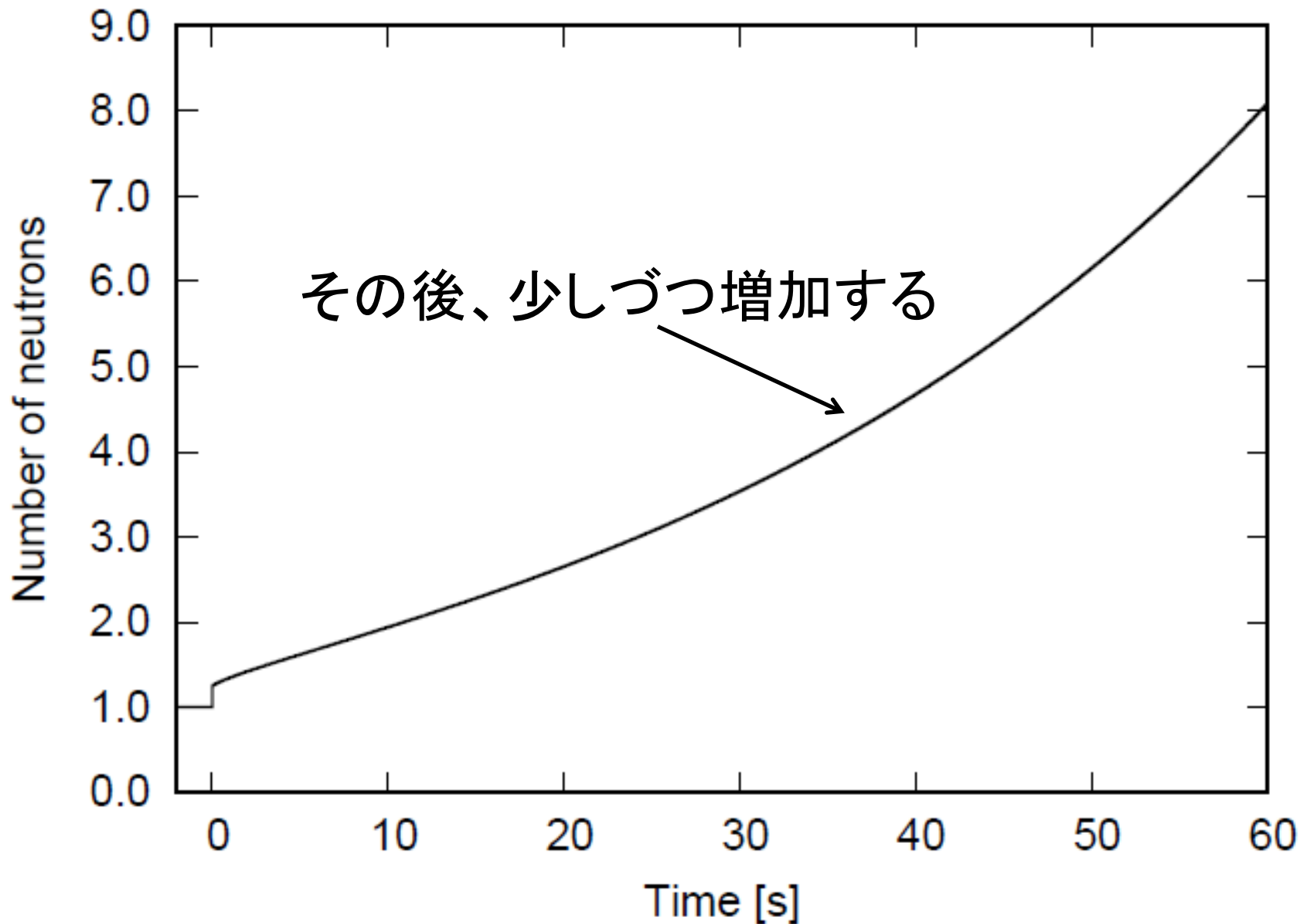
臨界状態の原子炉が超臨界になった直後の中性子数の変化



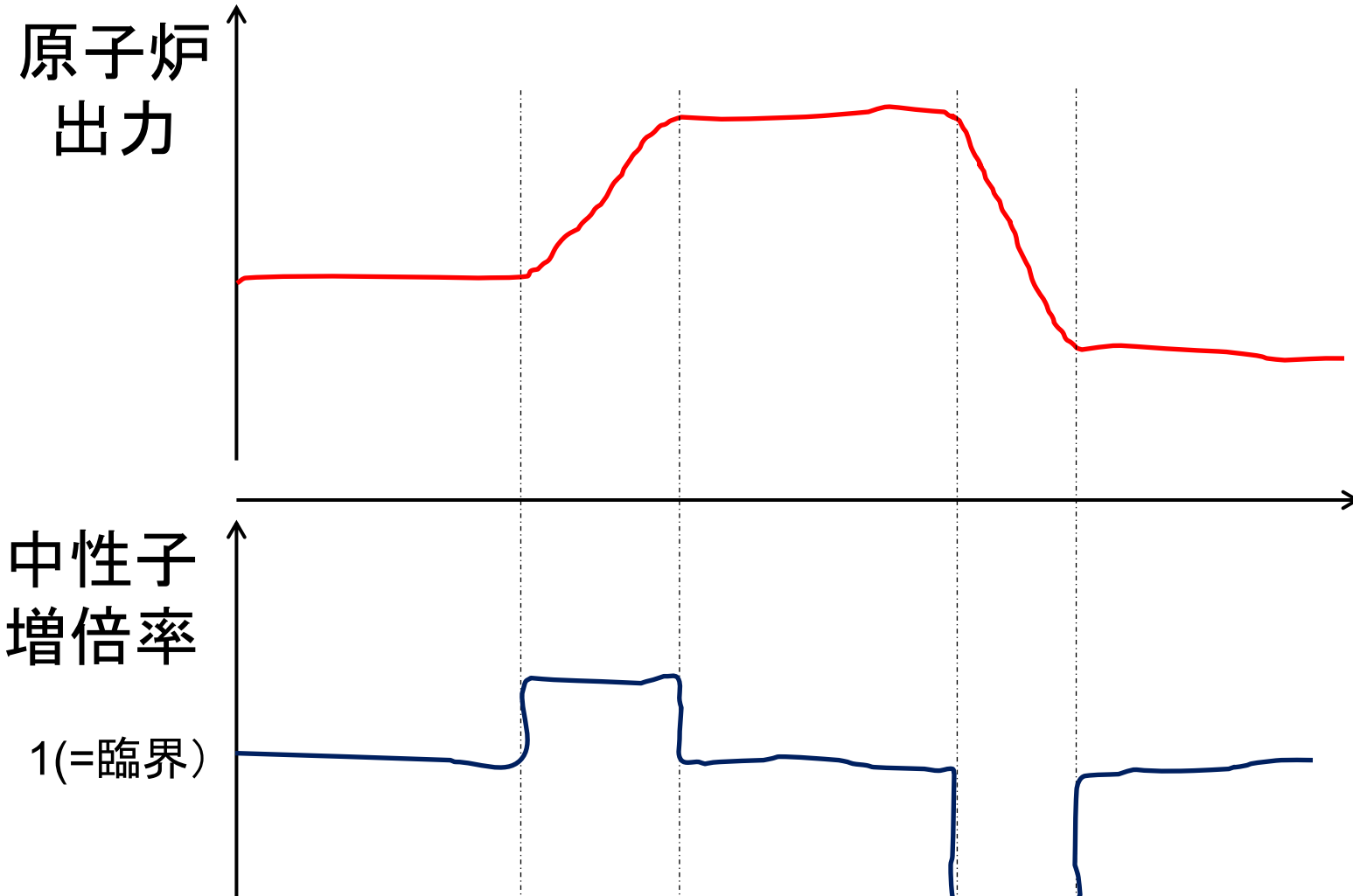
臨界状態の原子炉が超臨界になった直後の中性子数の変化



臨界状態の原子炉が超臨界になった直後の中性子数の変化



中性子増倍率と出力の関係(模式図)



なお、実際の高出力の原子力発電所では、温度フィードバックがあるため、このような挙動は示さないことに注意(以降の議論は「低出力」の原子炉に限定します)。

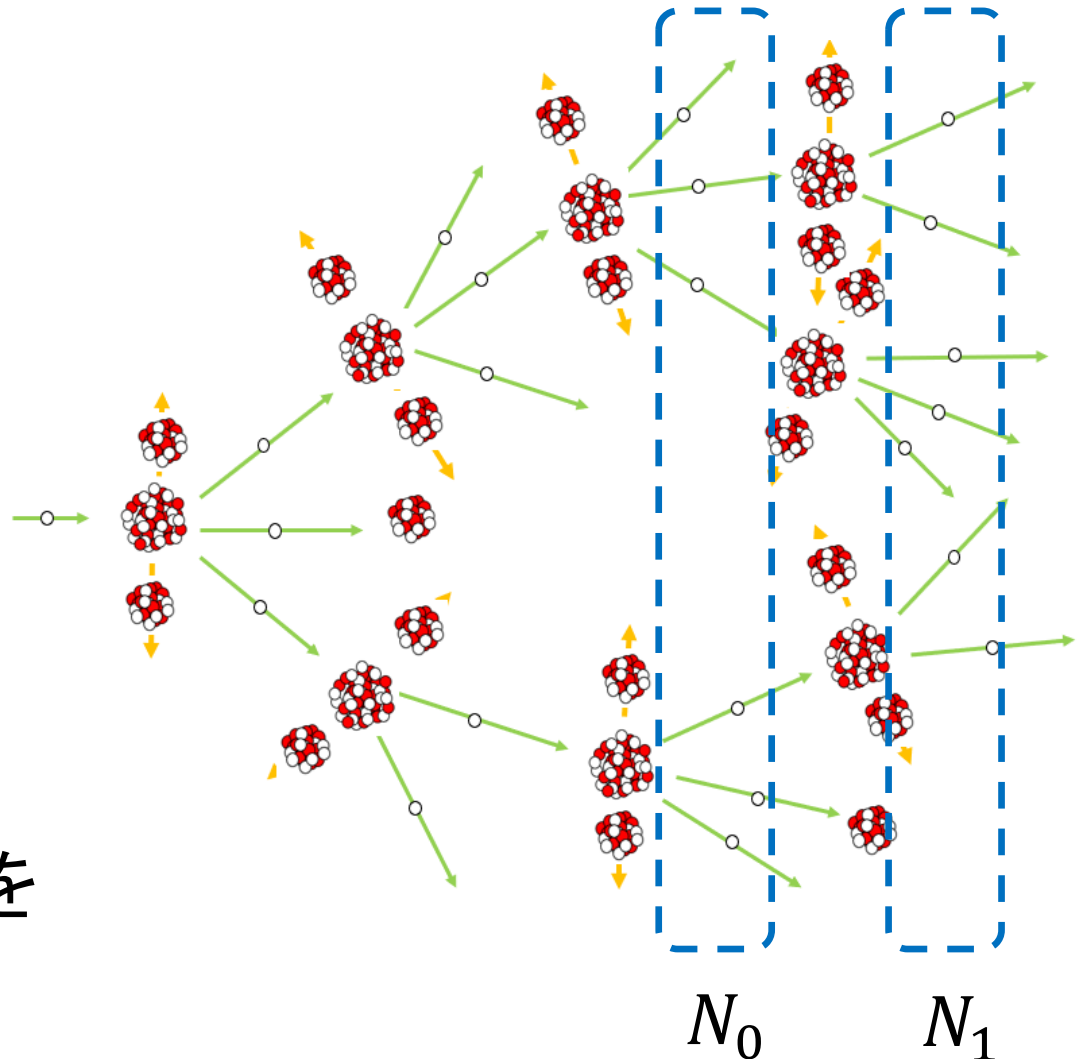
未臨界体系の中性子数

中性子増倍率

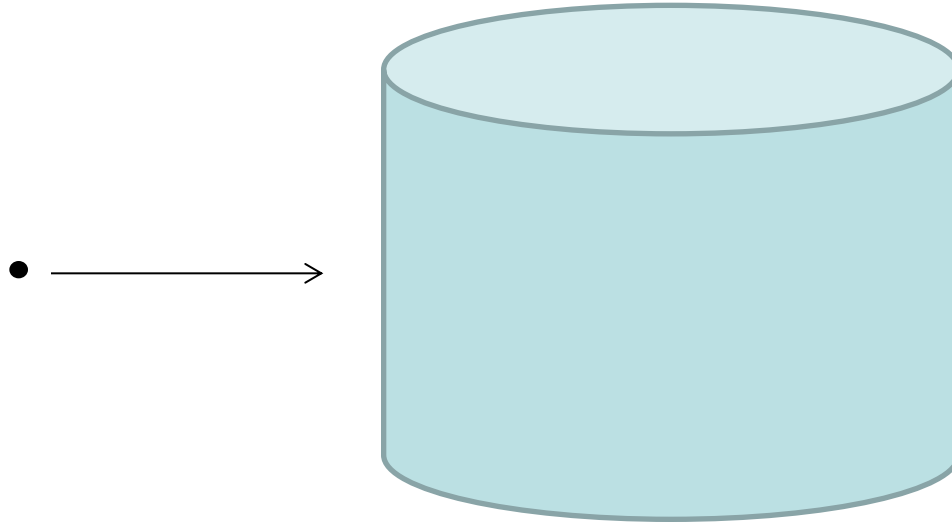
連続する世代の中性子数の比を「**中性子増倍率**」 k と定義する:

$$k = \frac{N_1}{N_0}$$

$k = 1$ のとき:**臨界**
原子炉の出力は、
時間とともにほぼ一定を
保つ。



未臨界体系での中性子数



未臨界（中性子増倍率 $k < 1$ ）の体系に S 個の中性子を瞬時に打ち込んだとき、この中性子は合計で何個の中性子を生み出すことになるか？

未臨界体系での中性子数

未臨界(中性子増倍率 $k < 1$)の体系に S 個の中性子を瞬時に打ち込んだとき、この中性子は合計で何個の中性子を生み出すことになるか？

0世代	1世代	2世代	3世代	4世代	5世代	
S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S	...

未臨界体系での中性子数

未臨界(中性子増倍率 $k < 1$)の体系に S 個の中性子を瞬時に打ち込んだとき、この中性子は合計で何個の中性子を生み出すことになるか？

0世代	1世代	2世代	3世代	4世代	5世代	
S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S	...

未臨界体系での中性子数

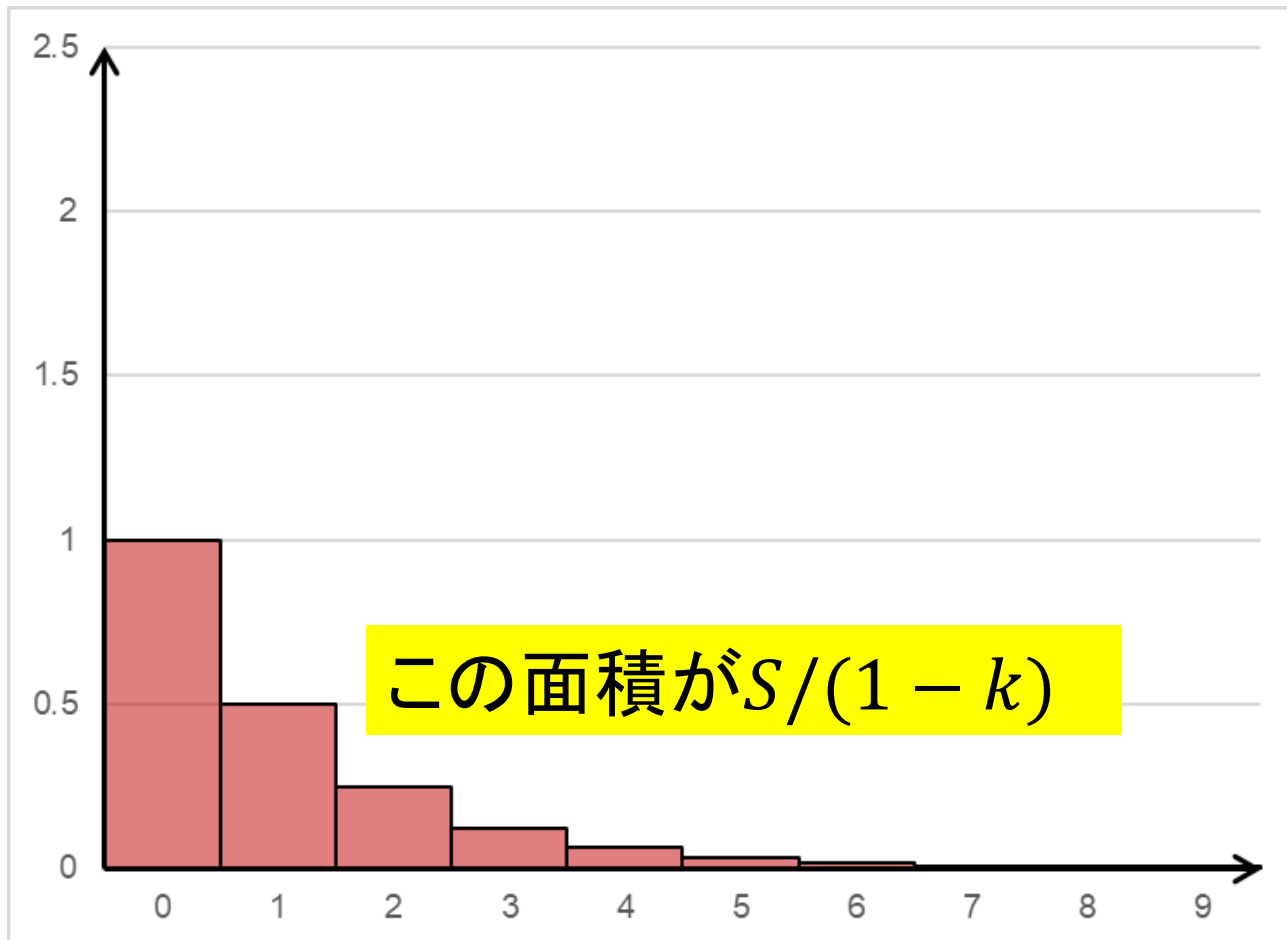
未臨界(中性子増倍率 $k < 1$)の体系に S 個の中性子を瞬時に打ち込んだとき、この中性子は合計で何個の中性子を生み出すことになるか？

0世代	1世代	2世代	3世代	4世代	5世代	
S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S	...

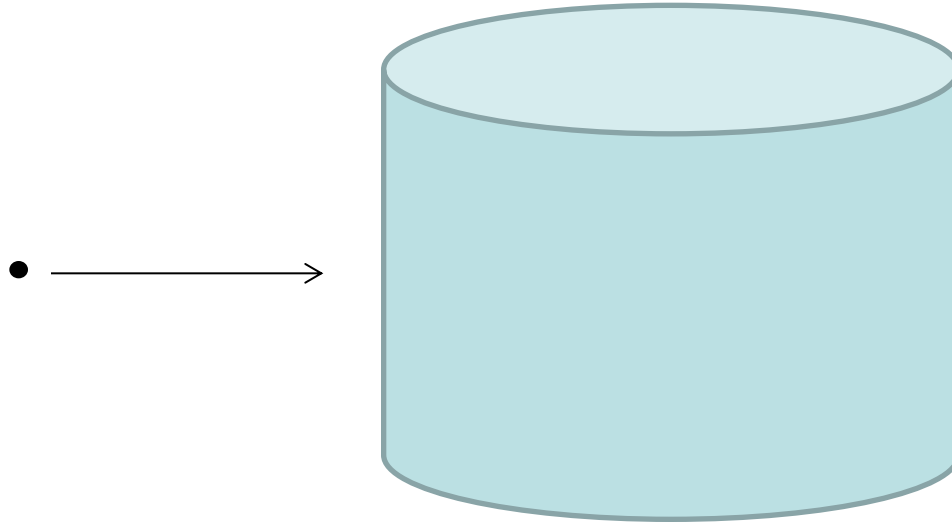
$$S + kS + k^2S + k^3S + \dots = \frac{S}{1 - k}$$

未臨界体系での中性子数

未臨界(中性子増倍率 $k < 1$)の体系に S 個の中性子を瞬時に打ち込んだとき、この中性子は合計で何個の中性子を生み出すことになるか？



未臨界体系での中性子数



未臨界(中性子増倍率 $k < 1$)の体系に1世代あたり S 個の中性子を打ち込んだとき、ある世代において体系に存在する中性子の総数は？

未臨界体系での中性子数

未臨界(中性子増倍率 $k < 1$)の体系に1世代あたり S 個の中性子を打ち込んだとき、ある世代において体系に存在する中性子の総数は？

0世代	1世代	2世代	3世代	4世代	5世代	
S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S	...

未臨界体系での中性子数

未臨界(中性子増倍率 $k < 1$)の体系に1世代あたり S 個の中性子を打ち込んだとき、ある世代において体系に存在する中性子の総数は？

0世代	1世代	2世代	3世代	4世代	5世代	
S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S	...
	S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S ...

未臨界体系での中性子数

未臨界(中性子増倍率 $k < 1$)の体系に1世代あたり S 個の中性子を打ち込んだとき、ある世代において体系に存在する中性子の総数は？

0世代	1世代	2世代	3世代	4世代	5世代	
S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S	...
	S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S ...
		S	kS	k^2S	k^3S	k^4S
			S	kS	k^2S	k^3S
				S	kS	k^2S

未臨界体系での中性子数

未臨界(中性子増倍率 $k < 1$)の体系に1世代あたり S 個の中性子を打ち込んだとき、ある世代において体系に存在する中性子の総数は？

0世代	1世代	2世代	3世代	4世代	5世代	
S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S	...
	S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S ...
		S	kS	k^2S	k^3S	k^4S
			S	kS	k^2S	k^3S
				S	kS	k^2S

未臨界体系での中性子数

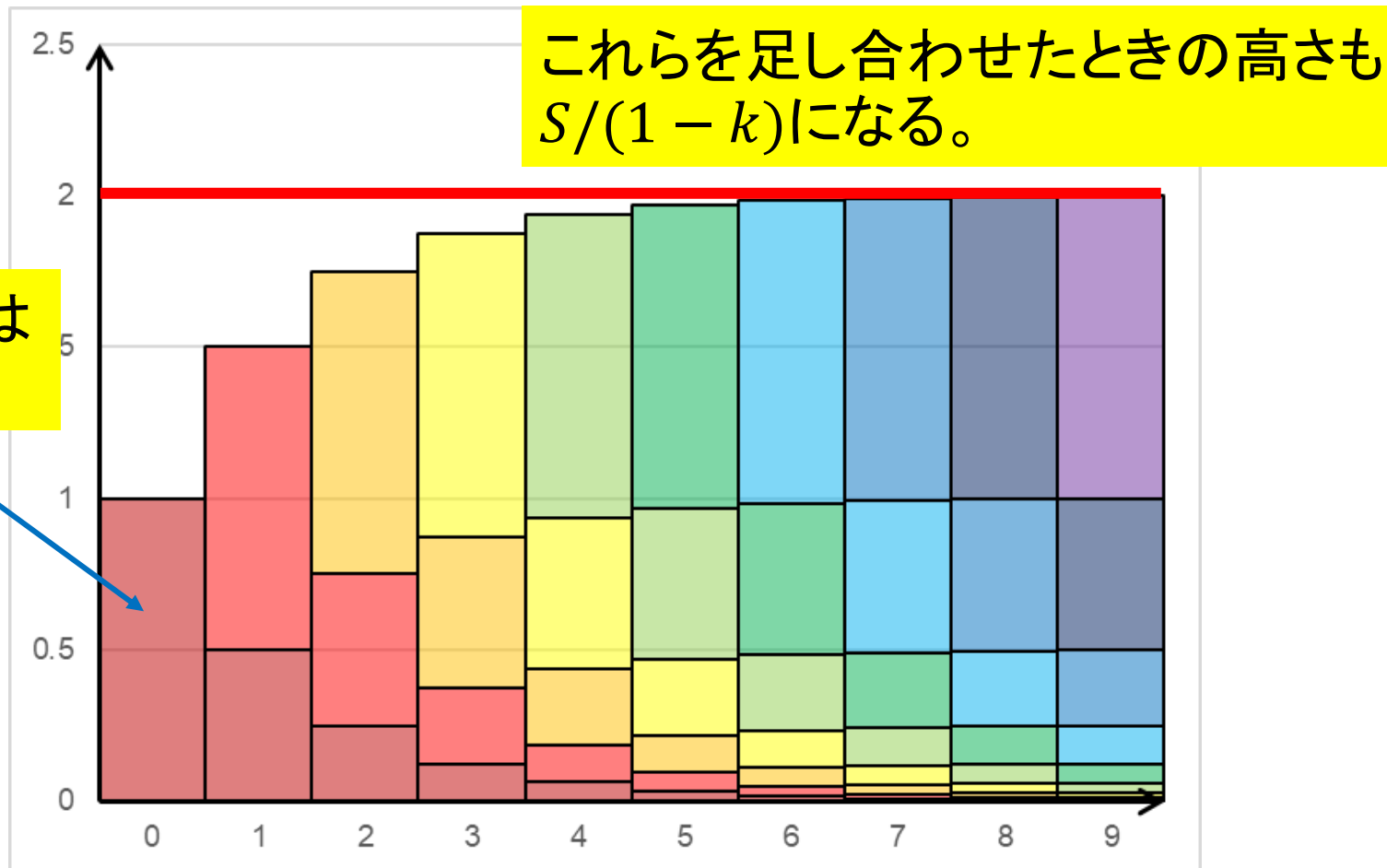
未臨界(中性子増倍率 $k < 1$)の体系に1世代あたり S 個の中性子を打ち込んだとき、ある世代において体系に存在する中性子の総数は？

0世代	1世代	2世代	3世代	4世代	5世代	
S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S	...
	S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S ...
		S	kS	k^2S	k^3S	k^4S
			S	kS	k^2S	k^3S
				S	kS	k^2S

$$S + kS + k^2S + k^3S + \dots = \frac{S}{1 - k}$$

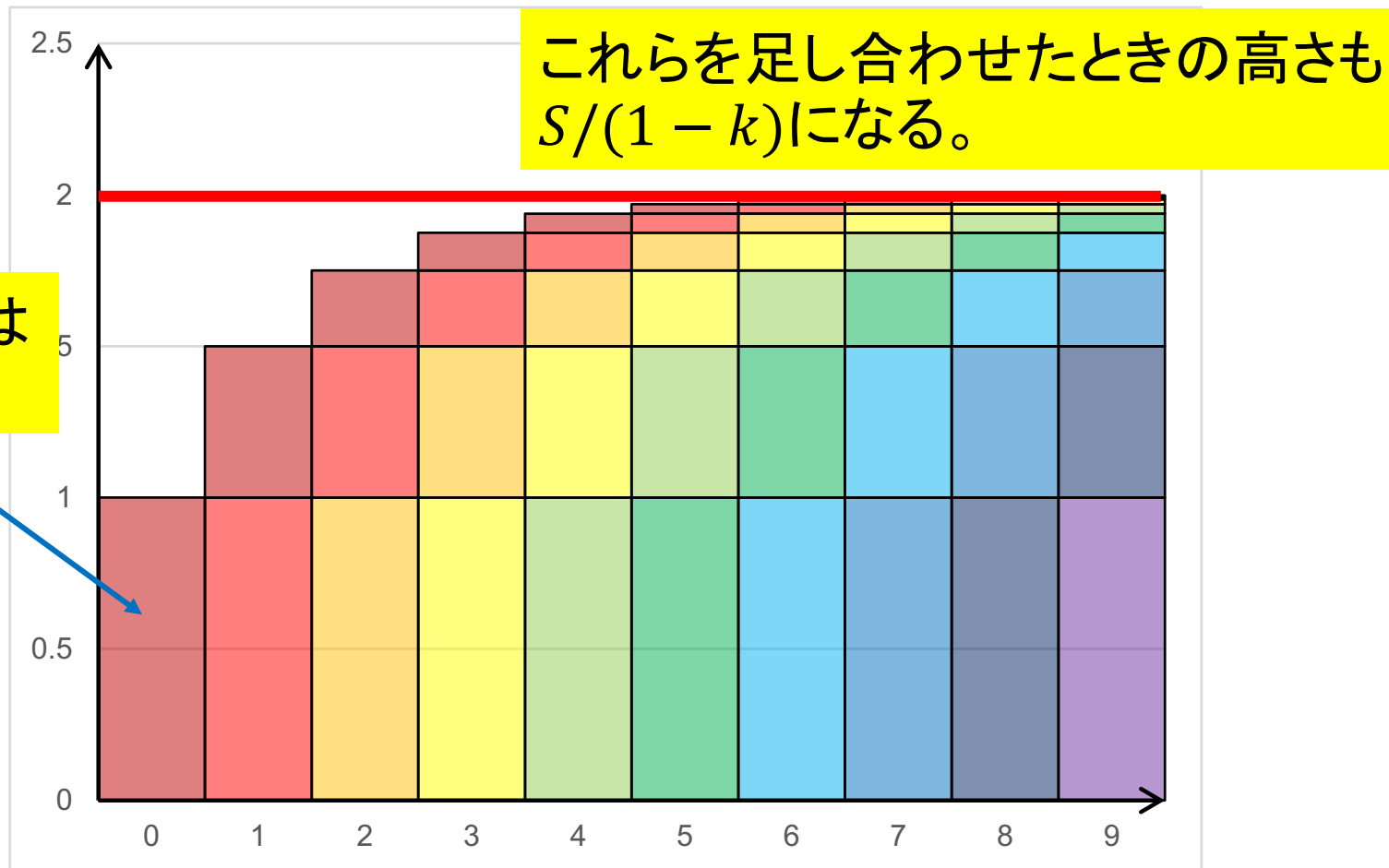
未臨界体系での中性子数

未臨界(中性子増倍率 $k < 1$)の体系に S 個の中性子を瞬時に打ち込んだとき、この中性子は合計で何個の中性子を生み出すことになるか？

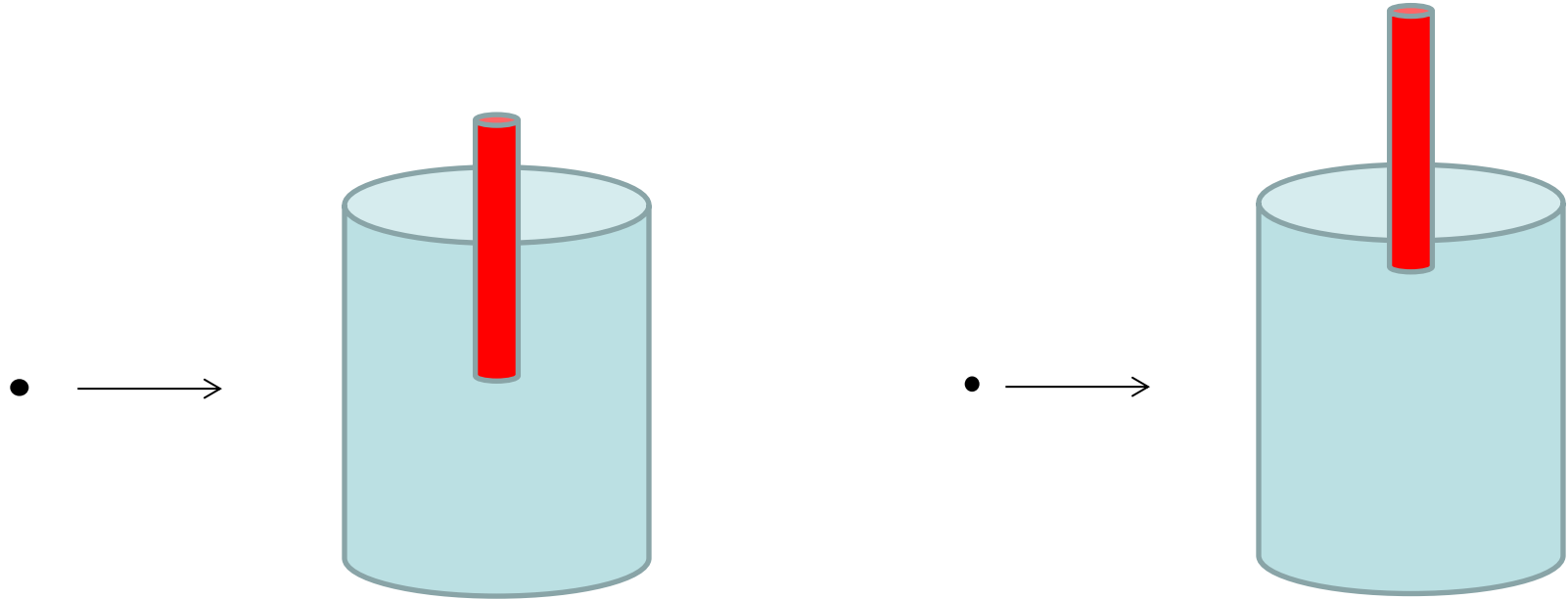


未臨界体系での中性子数

未臨界(中性子増倍率 $k < 1$)の体系に S 個の中性子を瞬時に打ち込んだとき、この中性子は合計で何個の中性子を生み出すことになるか？



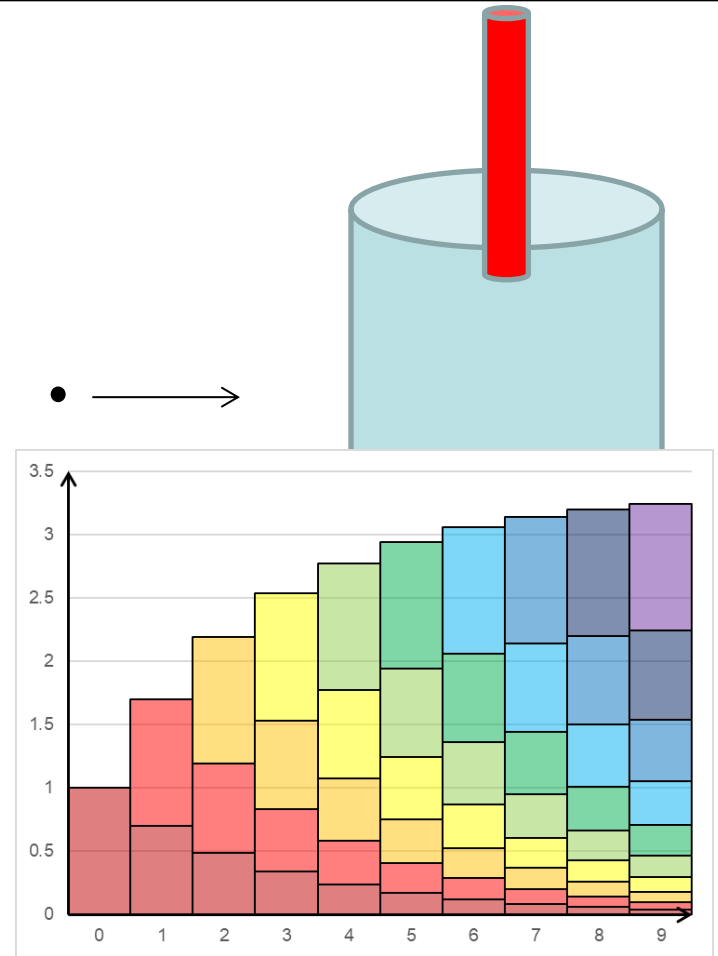
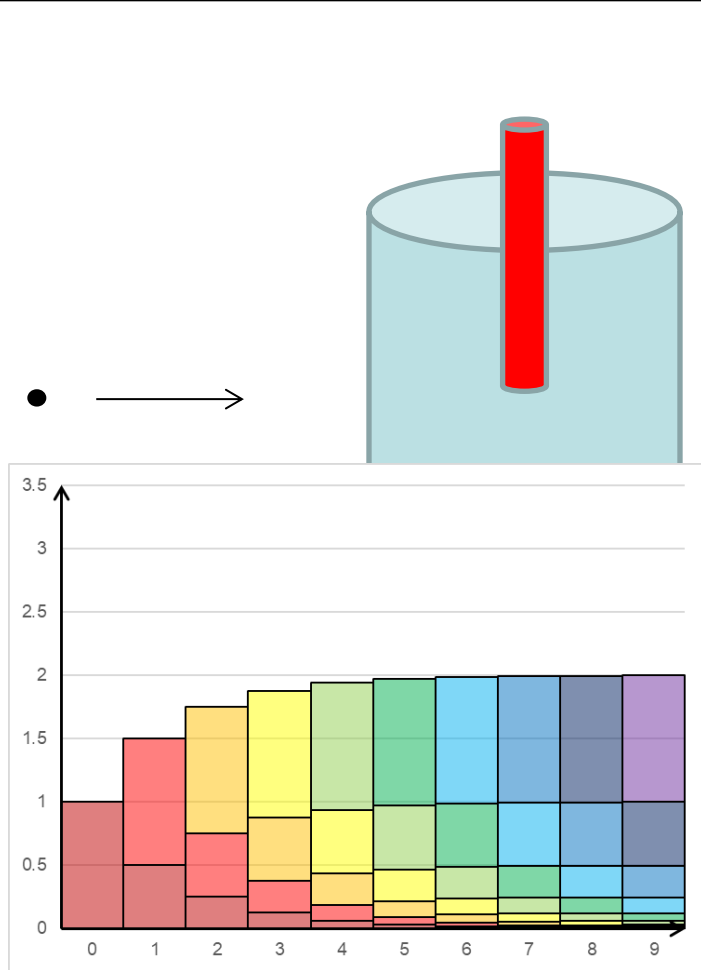
未臨界体系での中性子数



$$F = \frac{S}{1 - k}$$

同一の原子炉があり、いずれも制御棒が挿入されて未臨界であるとする。ただし、制御棒の挿入量が異なるものとする。ここに1世代あたり S 個の中性子を打ち込むものとする。しばらく時間が経過したとき、それぞれの原子炉に存在する中性子数はどちらが大きいのか？

未臨界体系での中性子数



同一の原子炉があり、いずれも制御棒が挿入されて未臨界であるとする。ただし、制御棒の挿入量が異なるものとする。ここに1世代あたり S 個の中性子を打ち込むものとする。しばらく時間が経過したとき、それぞれの原子炉に存在する中性子数はどちらが大きいのか？

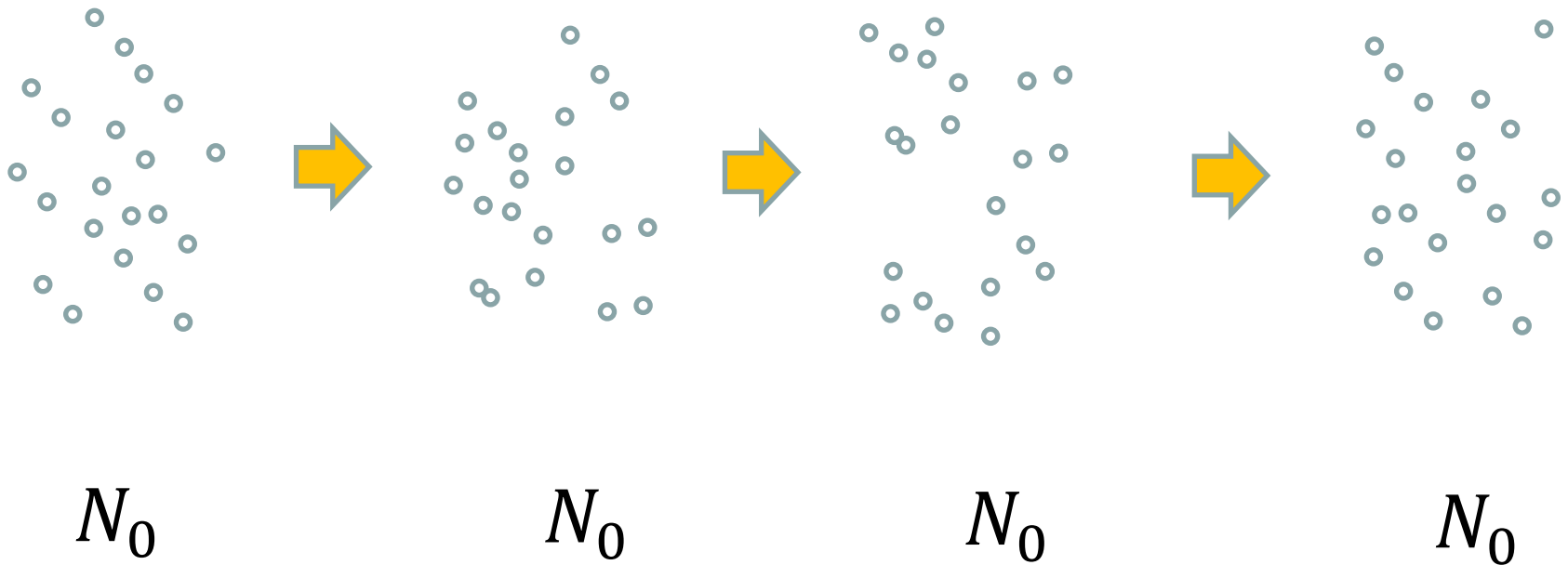
臨界体系での中性子数

臨界(中性子増倍率 $k = 1$)の体系に1世代あたり S 個の中性子を打ち込んだとき、体系に存在する中性子の総数は時間に対してどう変わる?

0世代	1世代	2世代	3世代	4世代	5世代	
S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S	...
	S	kS	k^2S	k^3S	k^4S	k^5S ...
		S	kS	k^2S	k^3S	k^4S
			S	kS	k^2S	k^3S
				S	kS	k^2S

「臨界」の厳密な定義

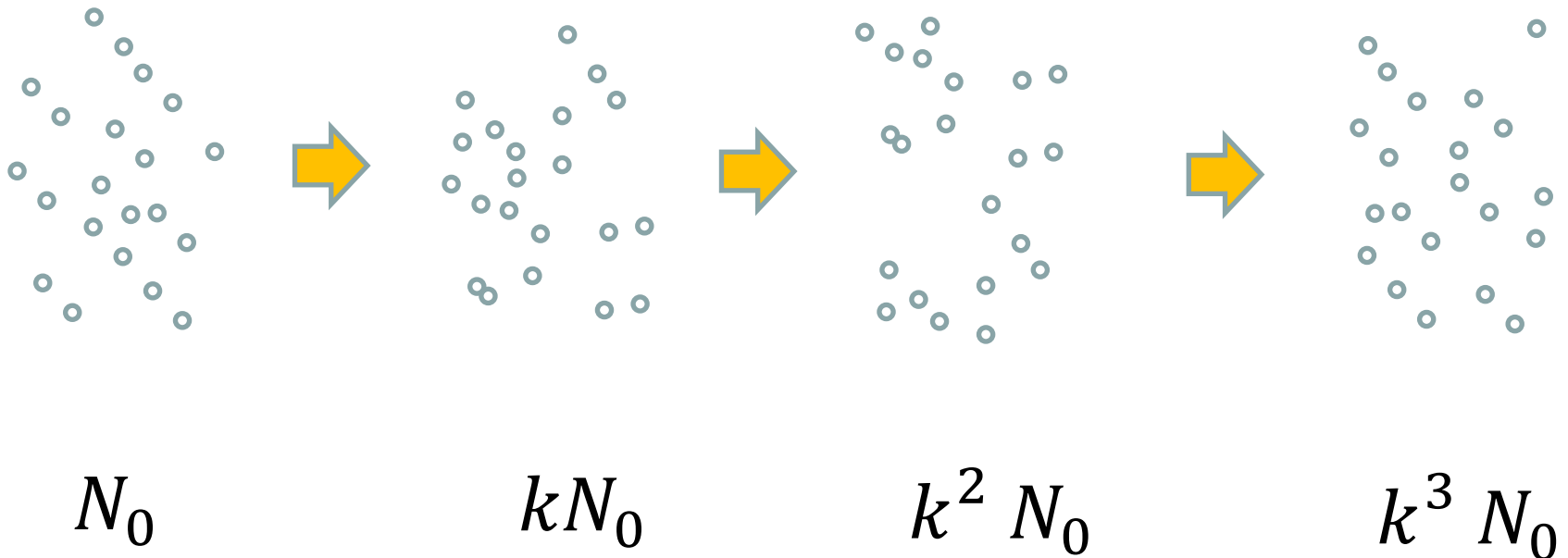
臨界とは、外部中性子源なしで核分裂連鎖反応が一定の割合で継続している状態（＝中性子の数が一定を保っている状態）



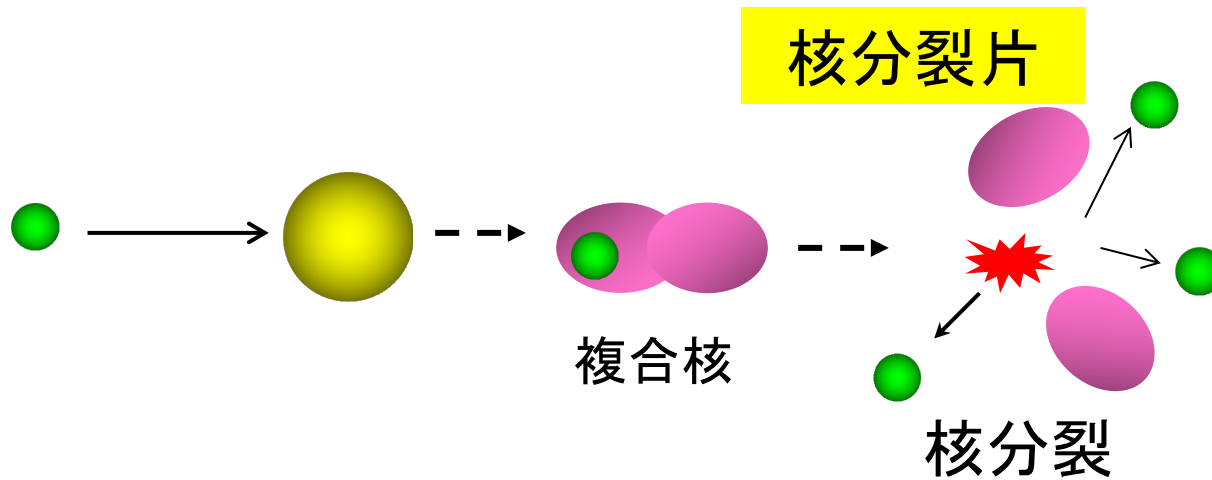
臨界と遅発中性子

中性子増倍率と中性子数との関係

中性子増倍率を k としたとき、1世代分の時間を経過する毎に、中性子数は k 倍されていく。

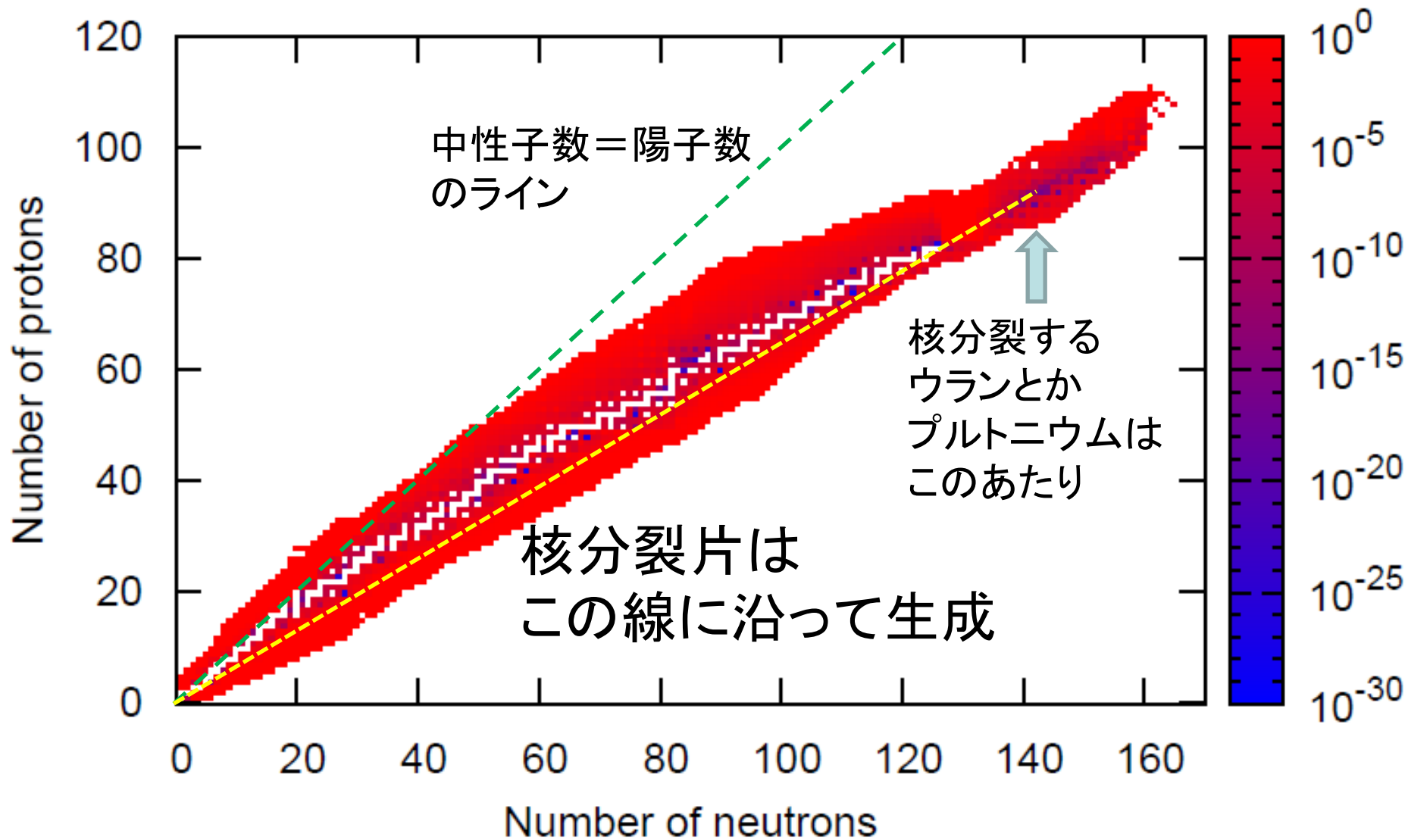


核分裂反応



- ・ウランやプルトニウムといった重い原子核で起こる。
- ・分裂した後の原子核を「核分裂片」と呼ぶ。

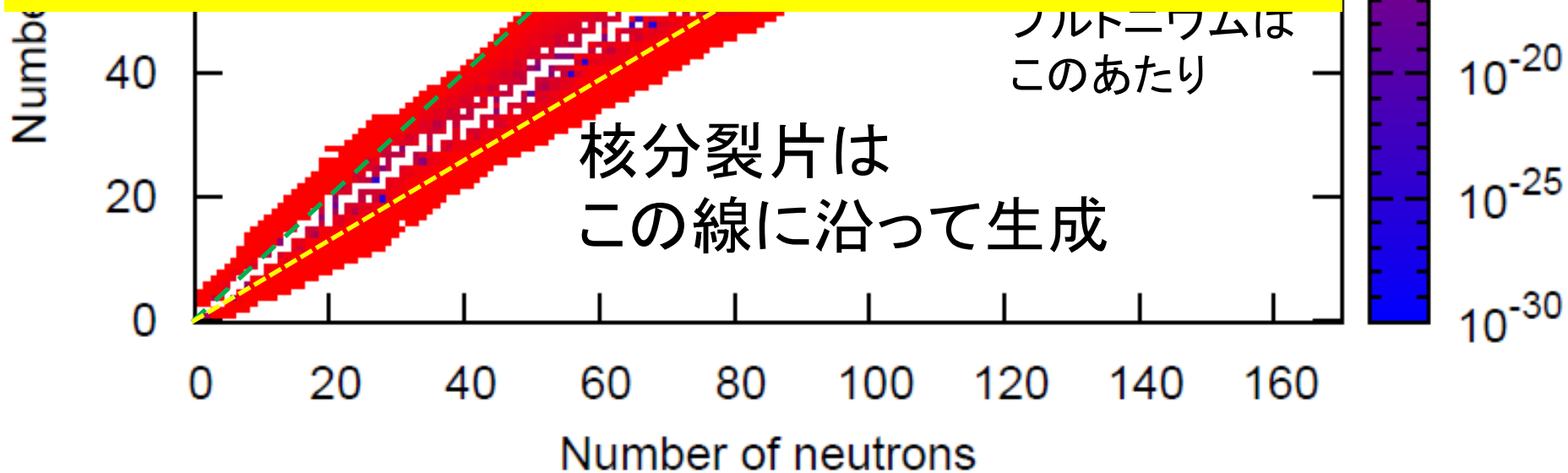
核分裂反応



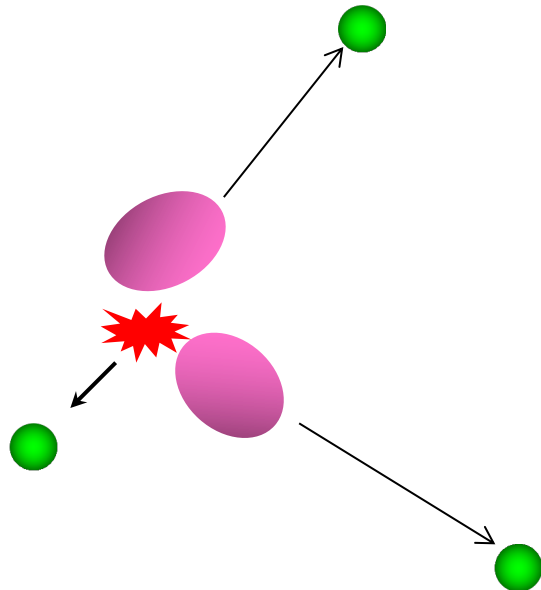
核分裂反応

核分裂片は中性子過剰核なので、 β 崩壊により安定化し、その過程でごく稀に中性子を放出する：
 β 崩壊は核分裂反応から遅れて起こるので、
この中性子の発生も時間的に遅れることになる
(秒オーダーで)。

→ 遅発中性子

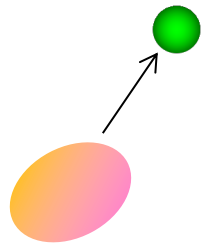


核分裂で発生する中性子



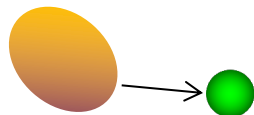
核分裂とほぼ同じタイミングで発生する中性子

→ 即発中性子



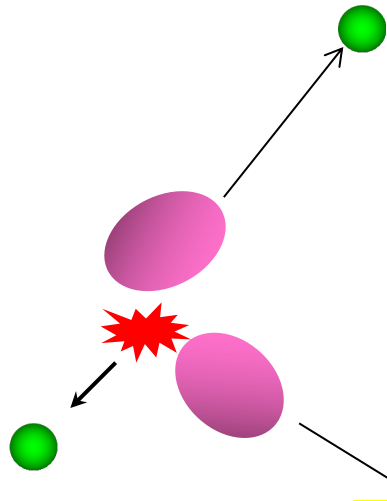
核分裂から遅れて、核分裂片が β 崩壊したときに発生する中性子

→ 遅発中性子



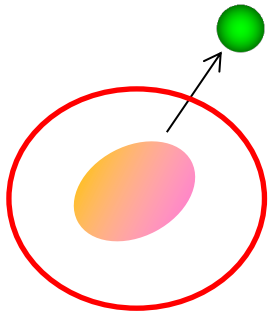
遅発中性子の割合は1%未満

核分裂で発生する中性子

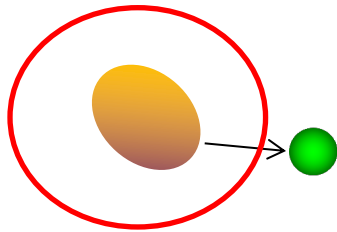


核分裂とほぼ同じタイミングで発生する中性子
→ 即発中性子

遅発中性子を放出する核分裂片：
遅発中性子先行核



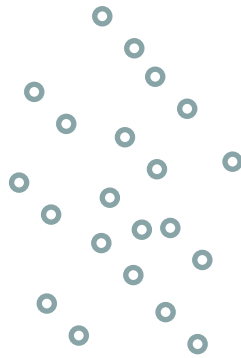
核分裂から遅れて、核分裂片が β 崩壊したときに発生する中性子
→ 遅発中性子



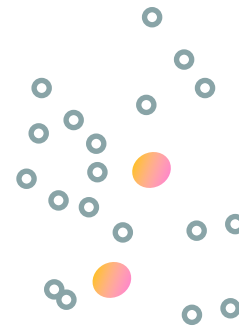
遅発中性子の割合は1%未満

中性子増倍率と中性子数との関係

中性子増倍率を k としたとき、1世代分の時間を経過すると、中性子数と先行核数は以下のように変わる。



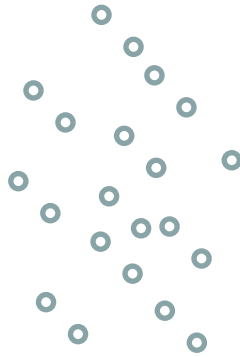
中性子数： N



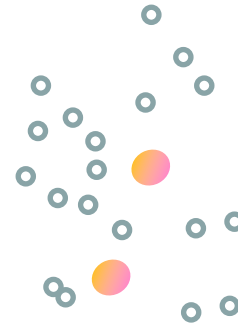
中性子数と先行核数の
総和： kN

そして、核分裂反応で生成される中性子のうち、遅発中性子である割合（つまり先行核として生成される割合）を β と定義する（例えばU-235の熱中性子核分裂では0.0065程度である）。

遅発中性子を考慮したときの連鎖反応



中性子数： N



中性子数： $(1 - \beta)kN$

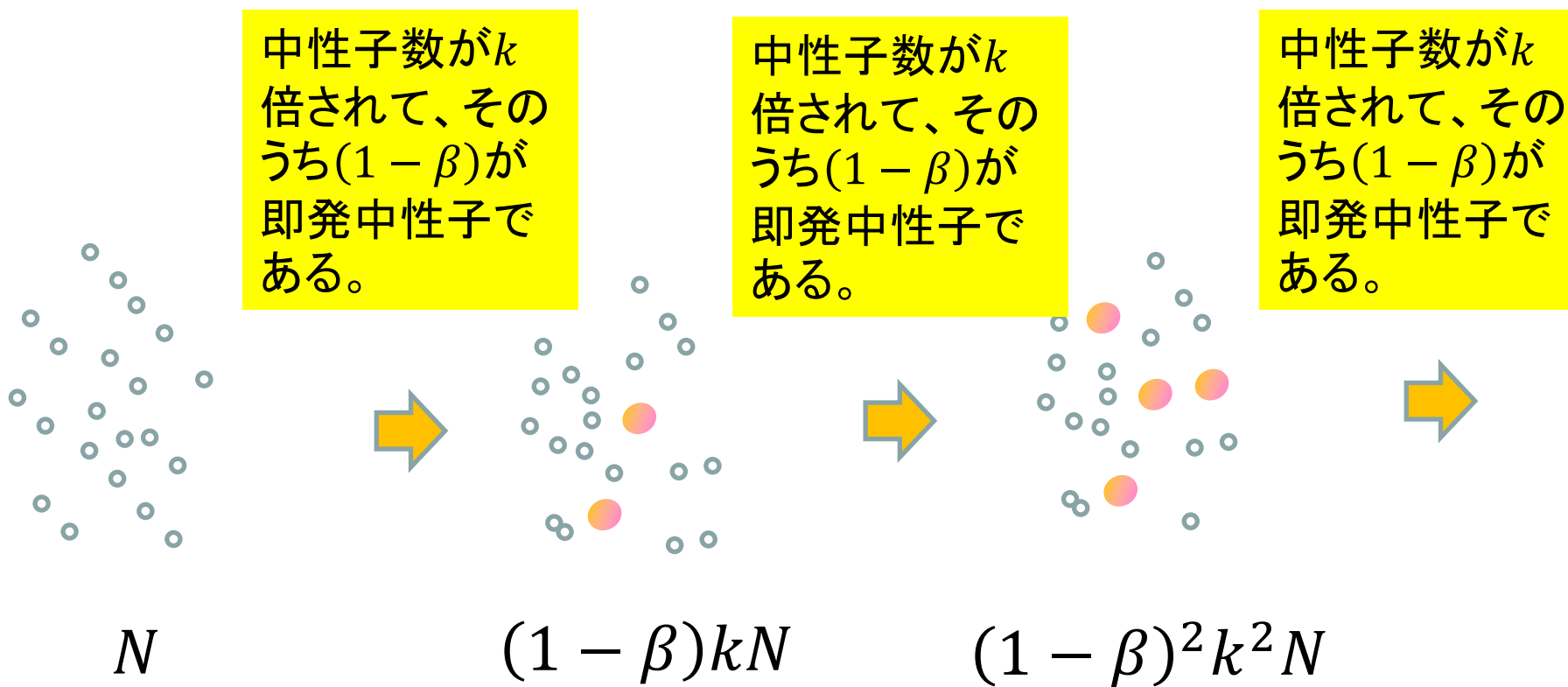
先行核数： βkN

上の総和： kN

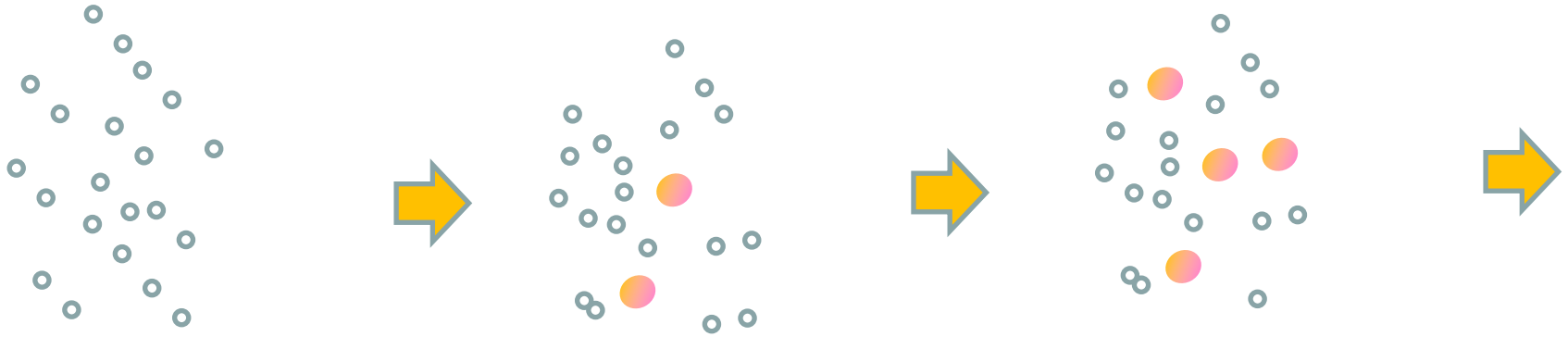
ある世代での中性子数が N 、中性子増倍率が k であるとき、1世代後には中性子数が $(1 - \beta)kN$ 、遅発中性子先行核数が βkN 個となる。

遅発中性子を考慮したときの連鎖反応

先行核からの遅発中性子の放出は1世代の時間(1~10 μ 秒)よりもはるかに長い(~秒)ため、以下の議論では無視して考える。それぞれの世代の(即発)中性子数は以下のように書ける。



遅発中性子を考慮したときの連鎖反応



中性子数： N

$$(1 - \beta)kN$$

$$(1 - \beta)^2 k^2 N$$

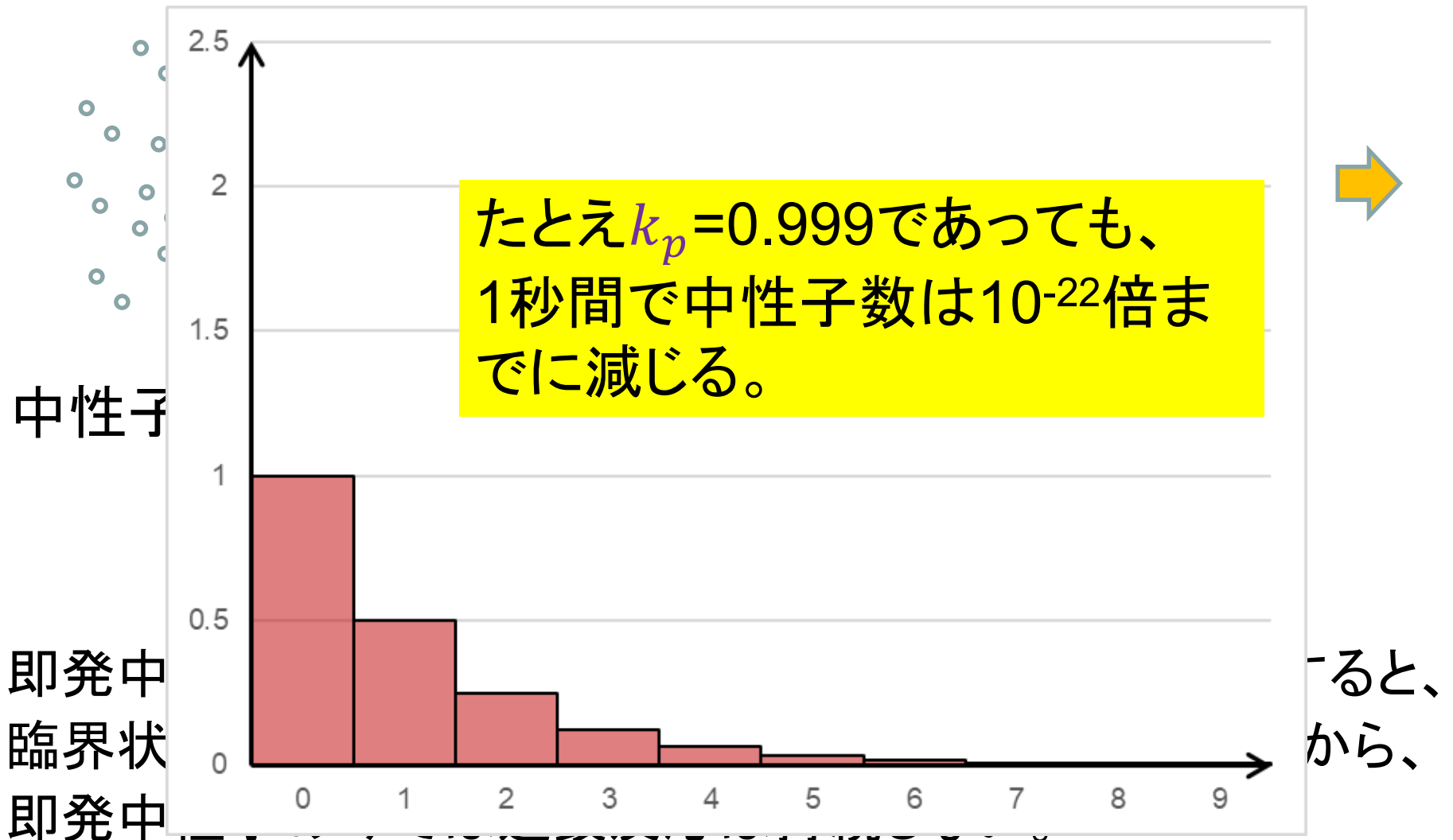
$$= k_p N$$

$$= k_p^2 N$$

即発中性子のみの中性子増倍率 $k_p = (1 - \beta)k$ を定義すると、
臨界状態 ($k = 1$) のときは、 $k_p = (1 - \beta) < 1$ であることから、
即発中性子のみでは連鎖反応は持続しない。

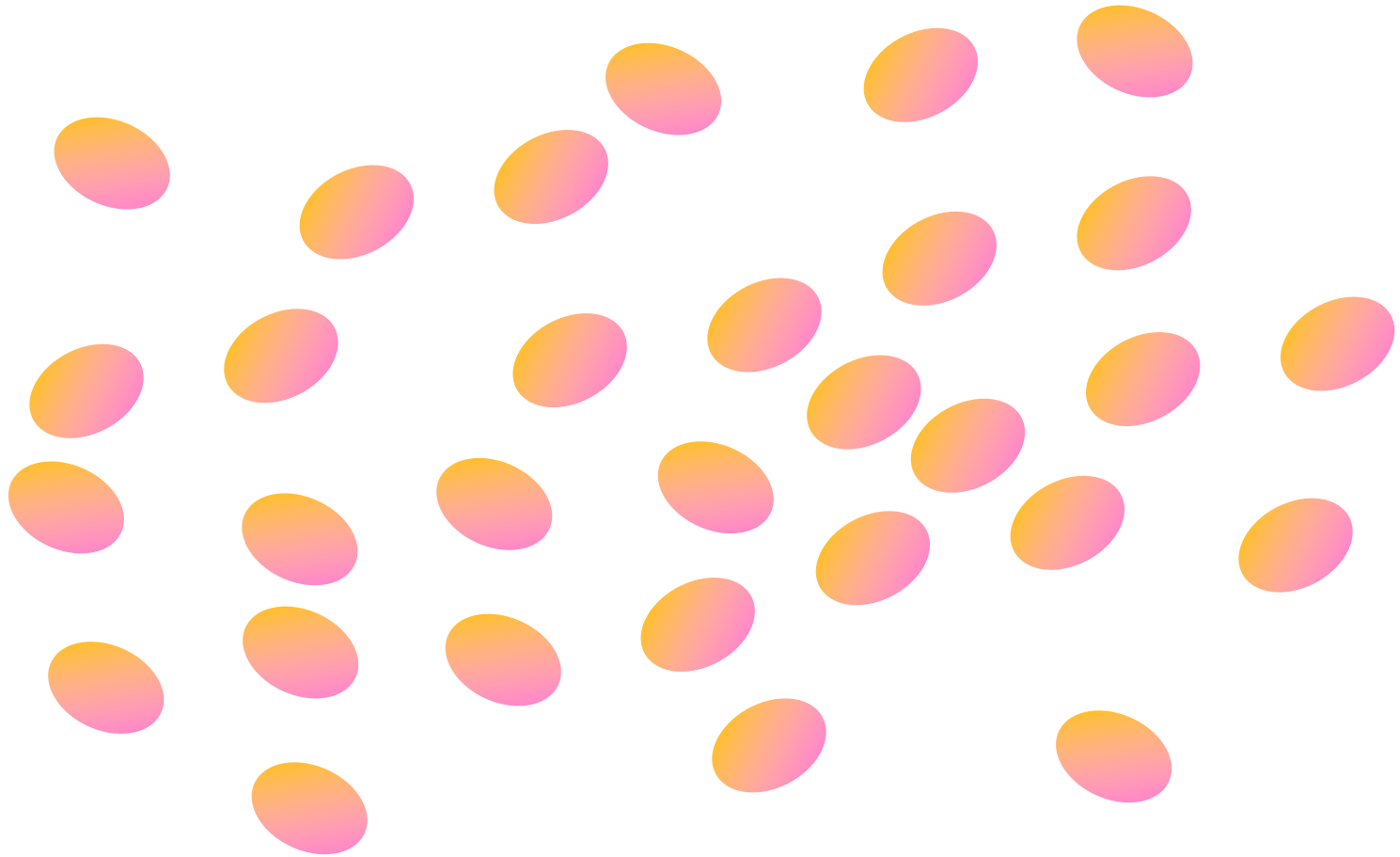
また、1世代の時間が極めて短いため、即発中性子による核分裂連鎖反応は(人間にとって)短い時間で途絶える。

遅発中性子を考慮したときの連鎖反応



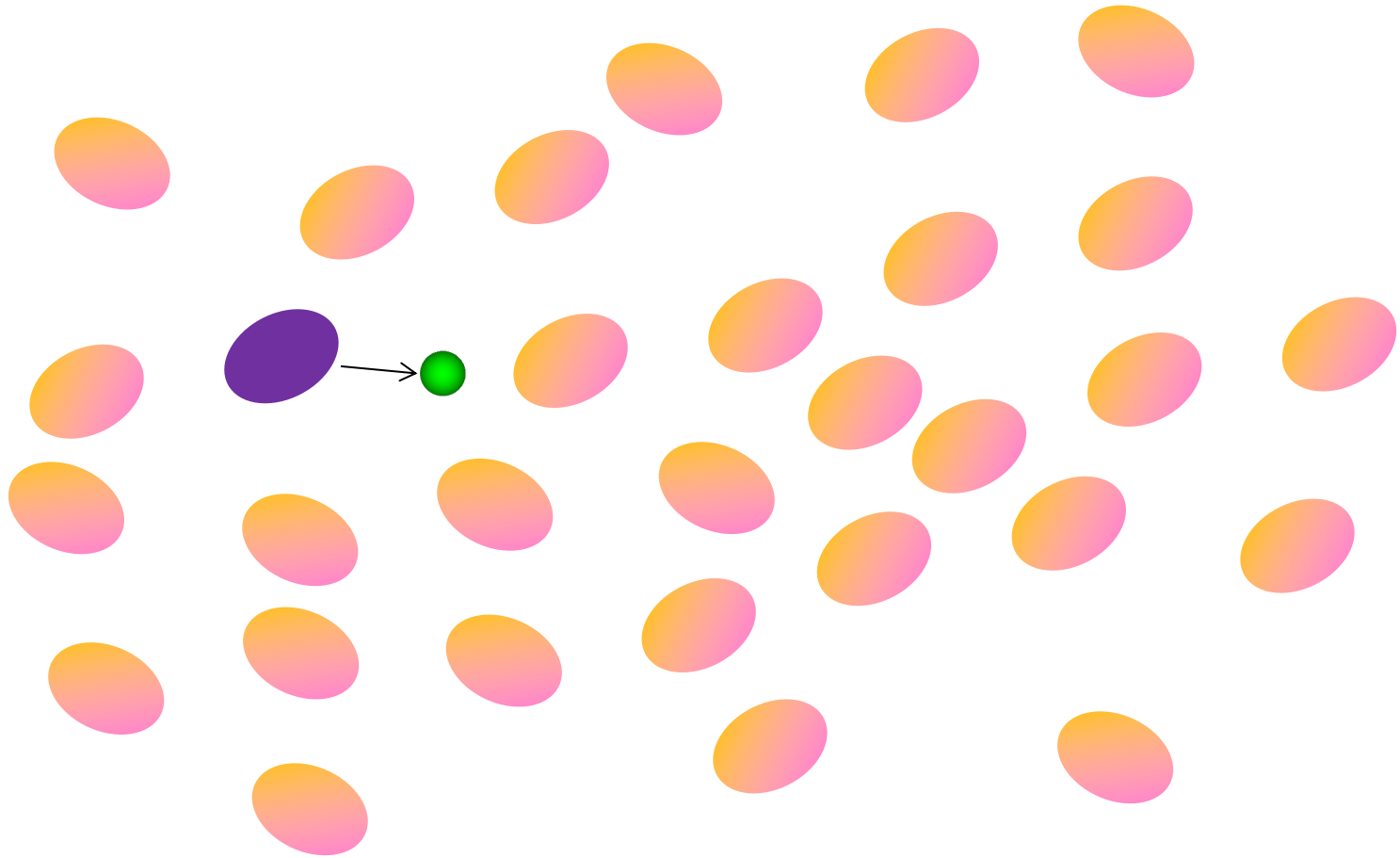
また、1世代の時間が極めて短いため、即発中性子による核分裂連鎖反応は(人間にとって)短い時間で途絶える。

臨界状態の一解釈



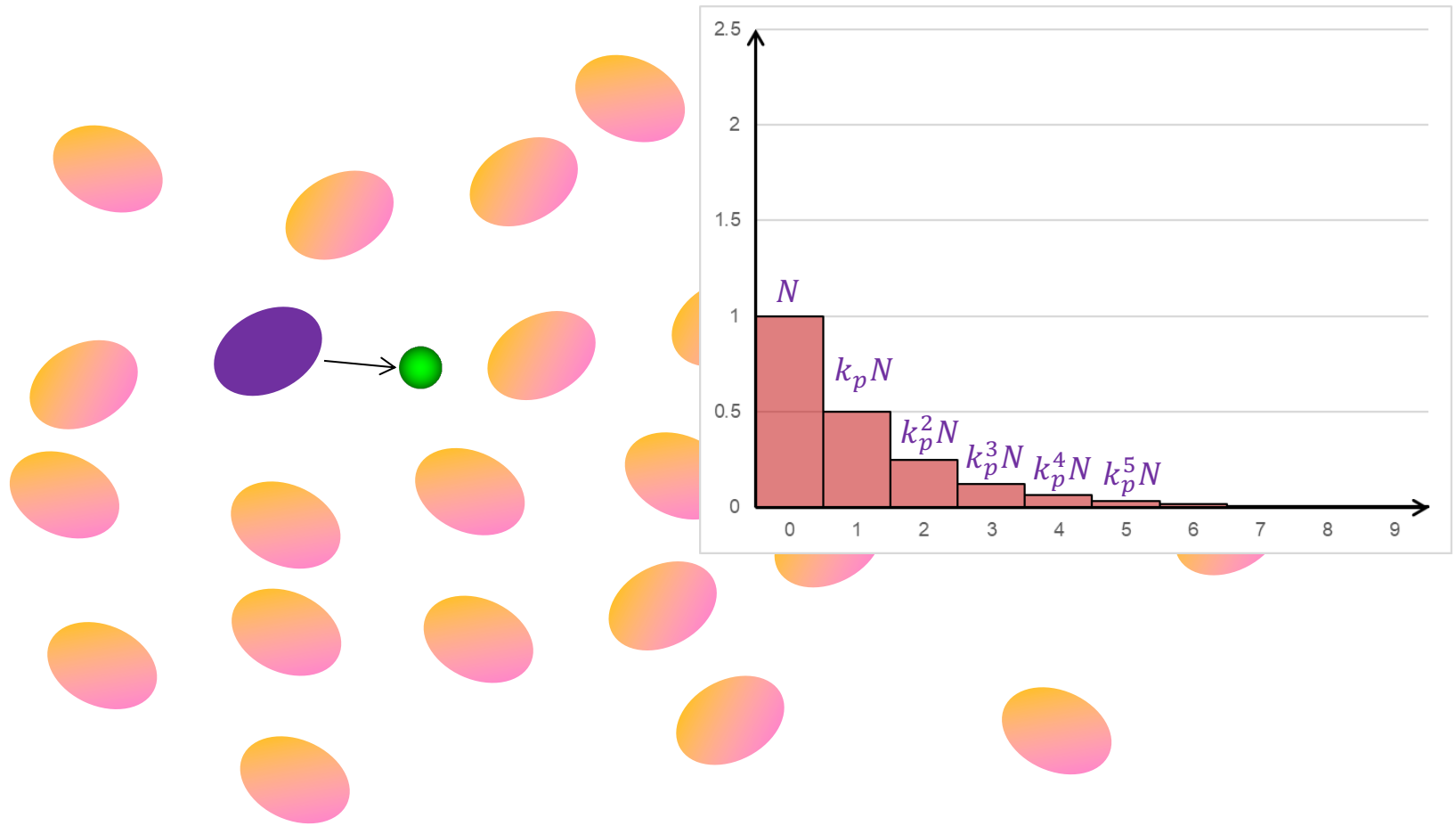
大量の遅発中性子先行核が燃料中に存在している。

臨界状態の一解釈



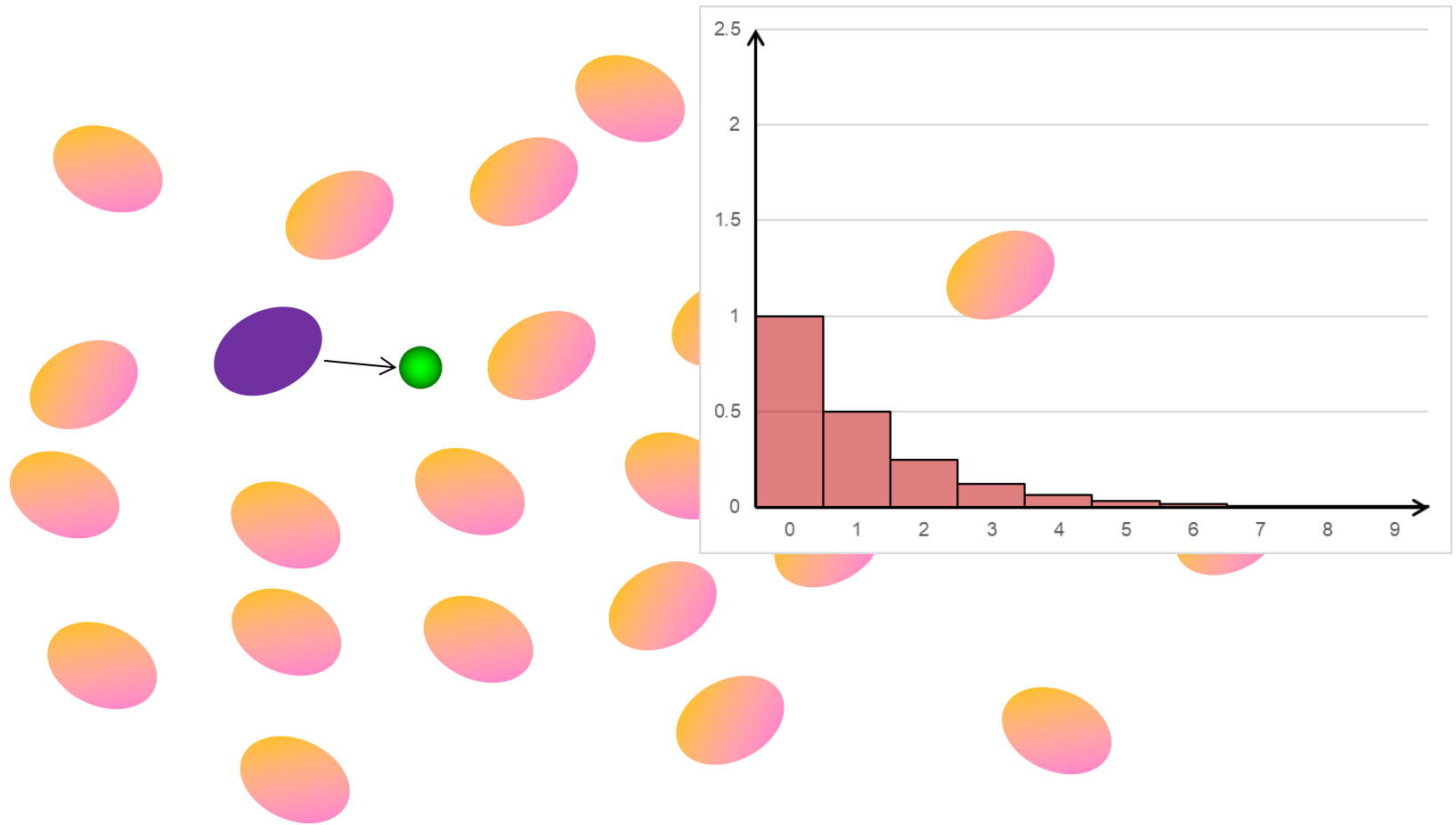
そのうちのひとつが β 崩壊により遅発中性子を放出する。

臨界状態の一解釈



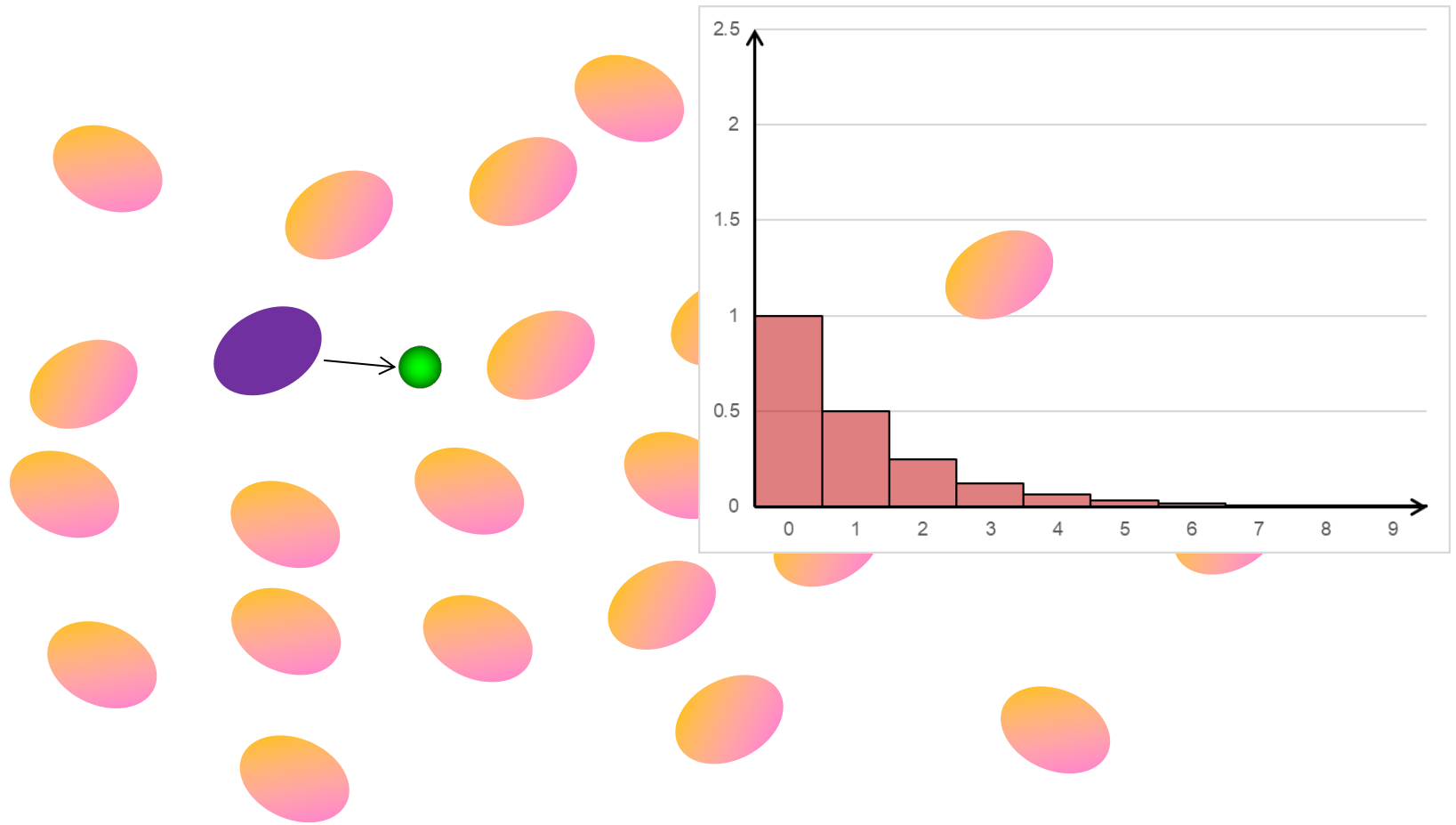
この遅発中性子が連鎖反応を生じさせるが、即発中性子のみでは反応は持続しないので、短い時間で中性子数はゼロに減衰する。

臨界状態の一解釈



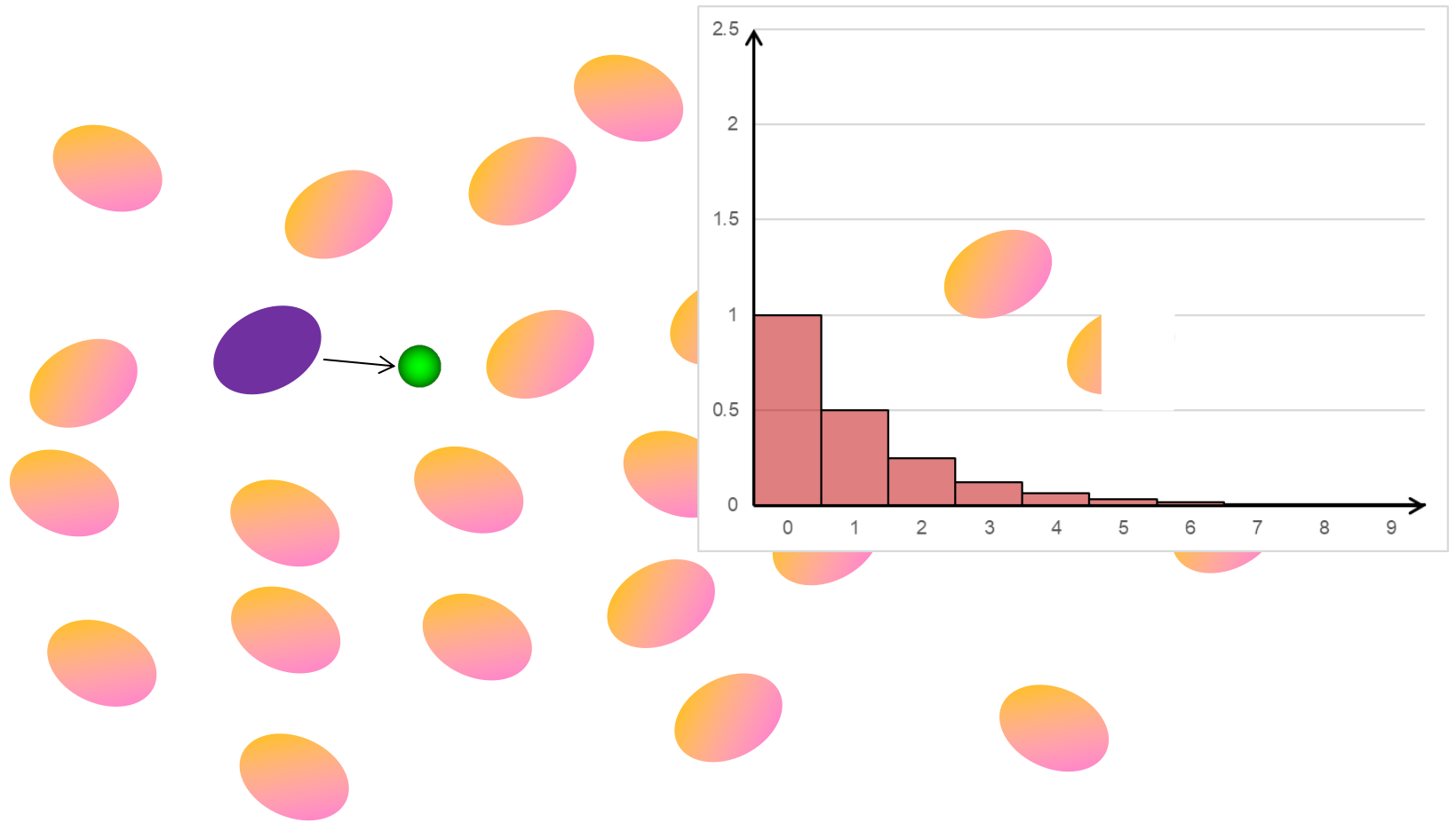
ただし、この短い時間での連鎖反応中に新たに遅発中性子先行核が生成する。

臨界状態の一解釈



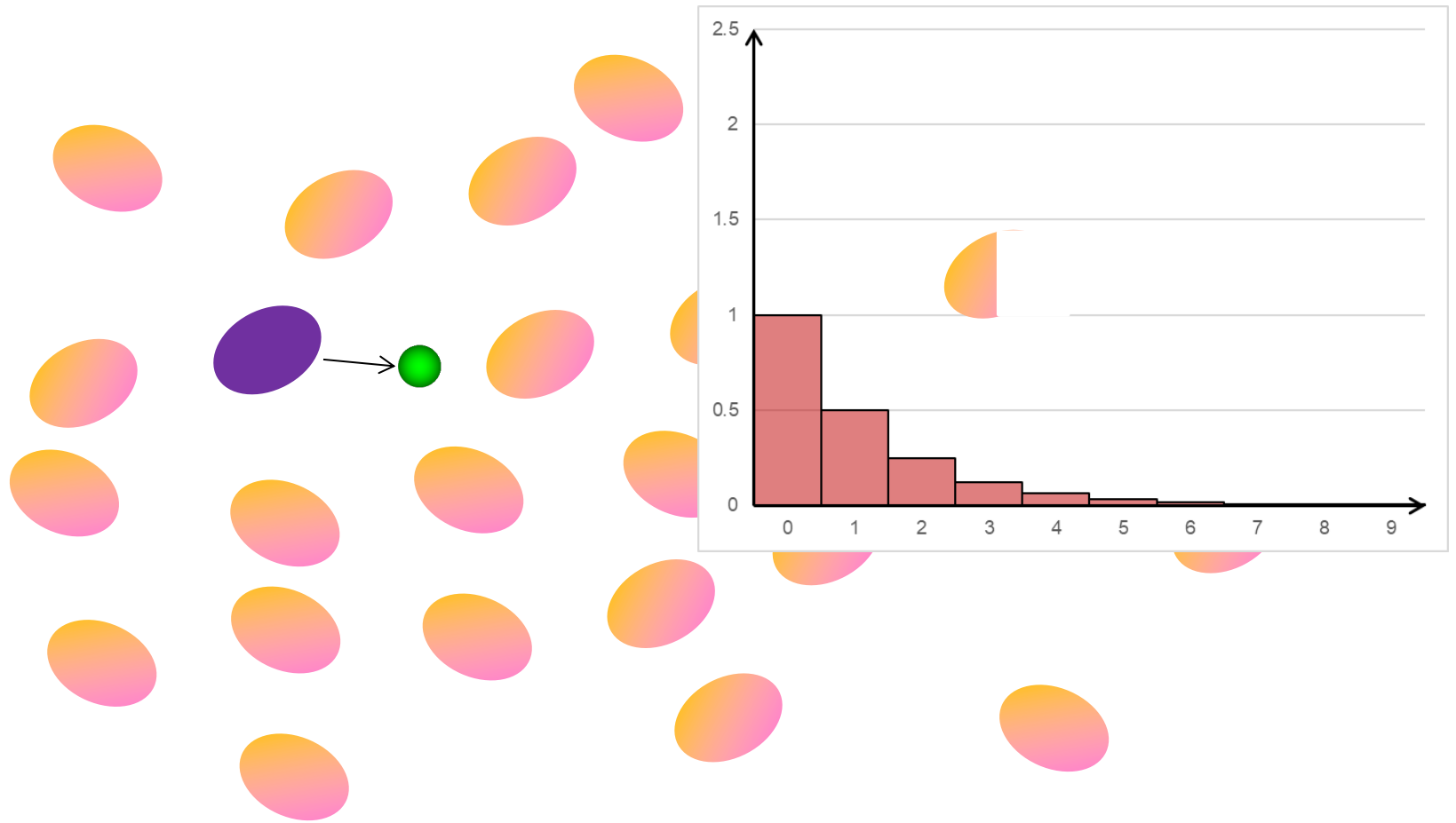
臨界状態では、この短い時間での連鎖反応中に生成する新たな遅発中性子先行核の個数が平均で1なので、遅発中性子先行核数は変わらない。

臨界状態の一解釈



臨界を少し超える状態では、この短い時間での連鎖反応中に生成する新たな遅発中性子先行核の個数が平均で1より大きいので、遅発中性子先行核数が少しずつ増加する。

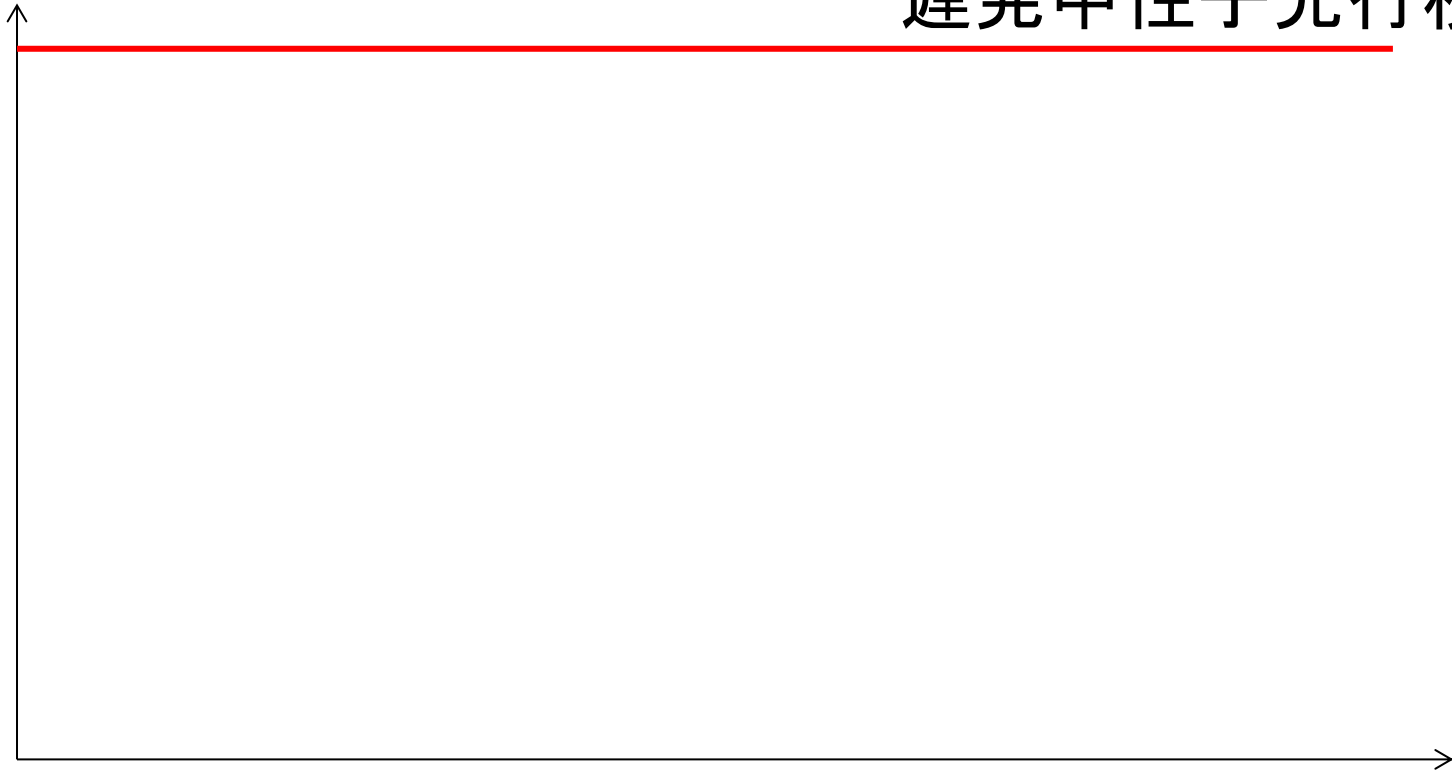
臨界状態の一解釈



臨界に少し足りない状態では、この短い時間での連鎖反応中に生成する新たな遅発中性子先行核の個数が平均で1より小さいので、遅発中性子先行核数が少しずつ減少する。

臨界状態の一解釈

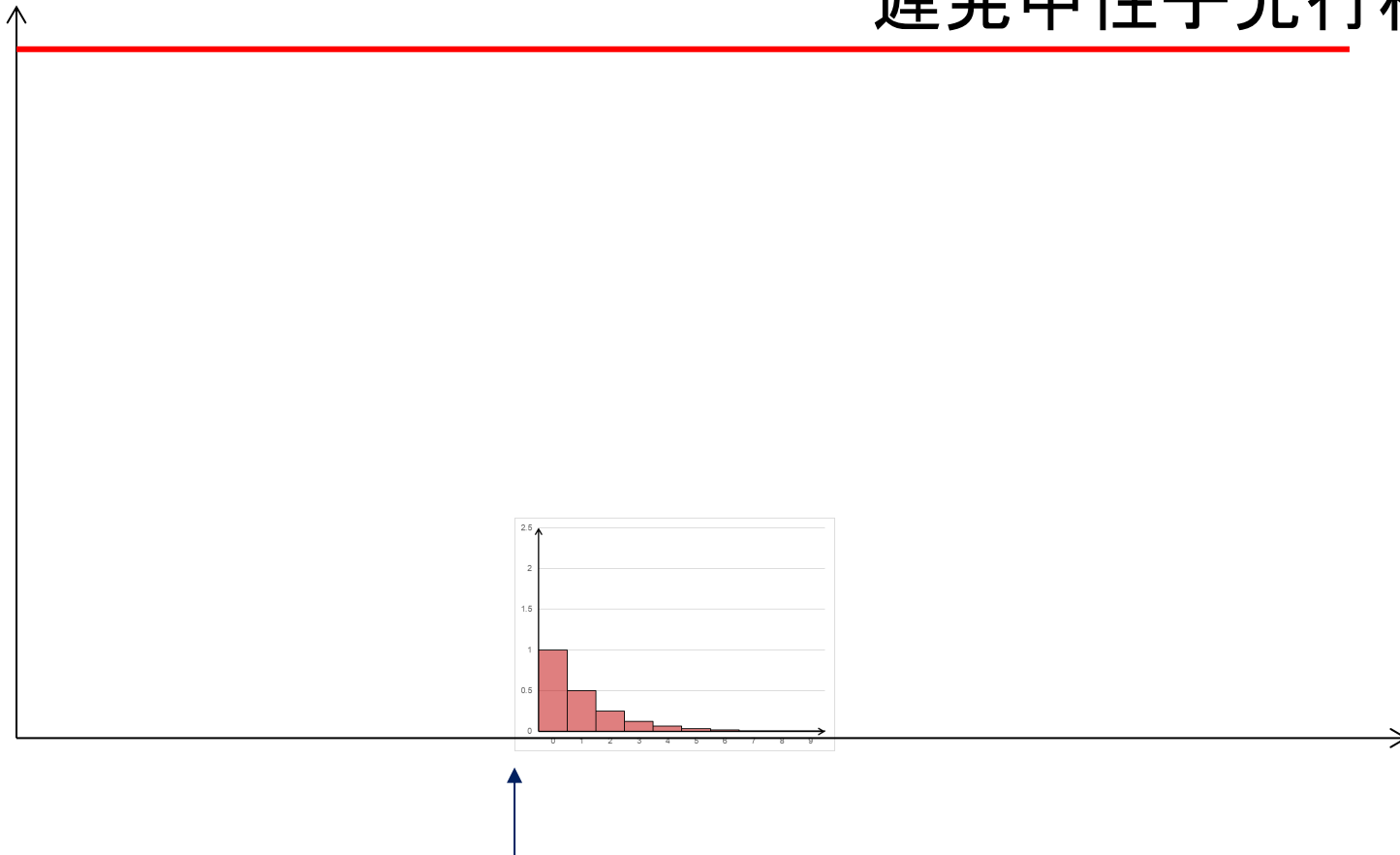
遅発中性子先行核数



時間の経過

臨界状態の一解釈

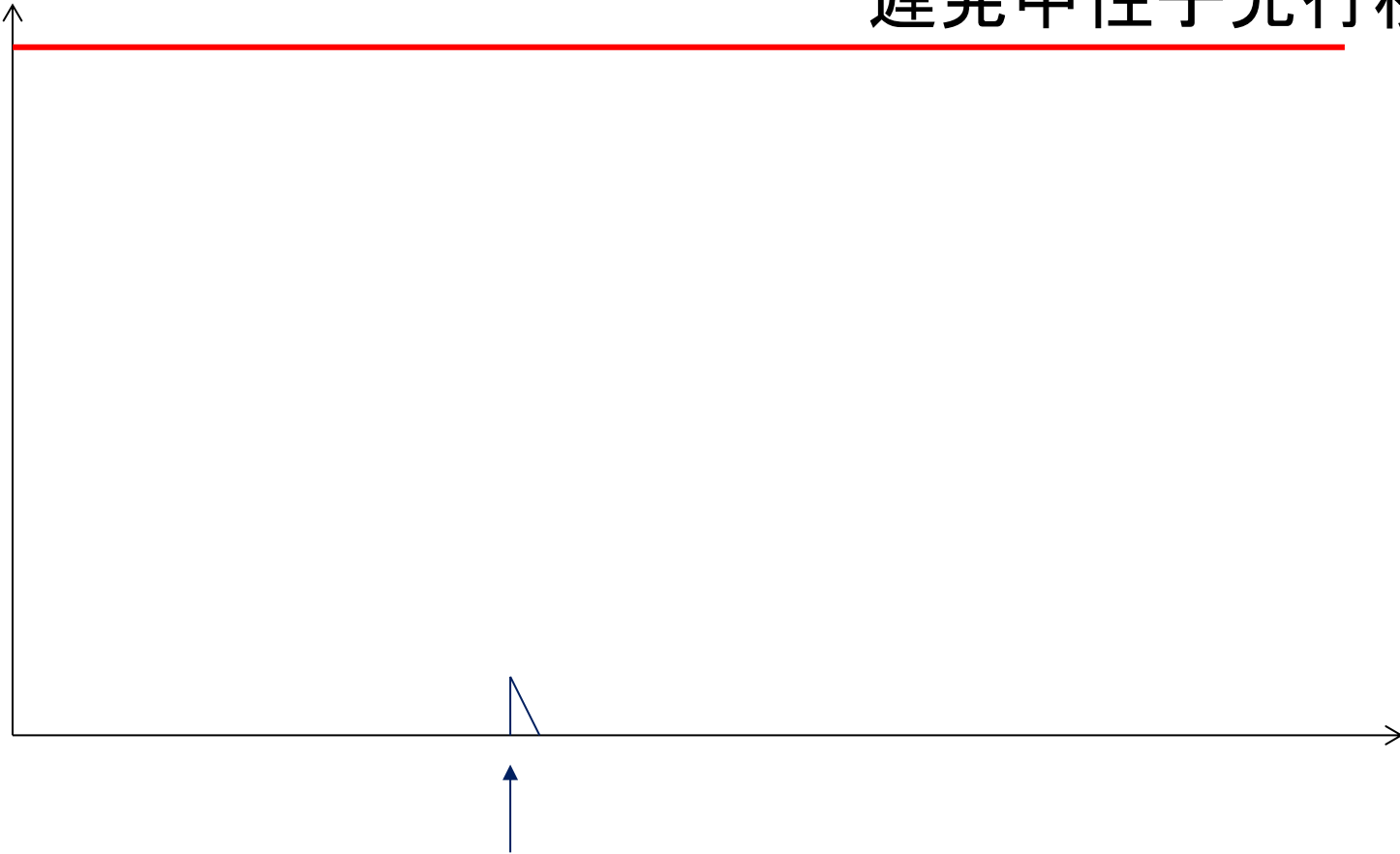
遅発中性子先行核数



例えばここで遅発中性子が発生したら、
即発中性子のみによる連鎖反応が生じる。

臨界状態の一解釈

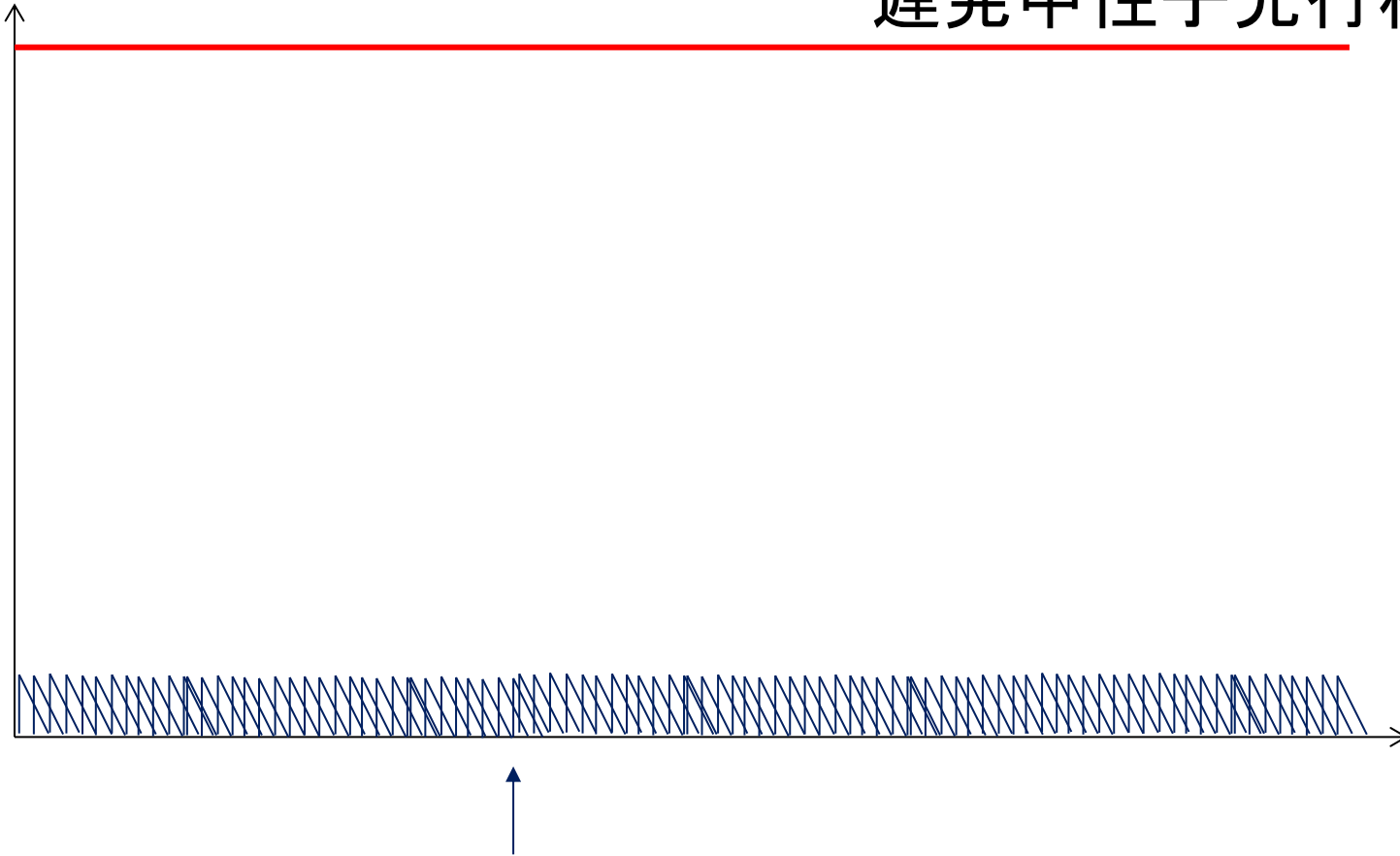
遅発中性子先行核数



例えばここで遅発中性子が発生したら、
即発中性子のみによる連鎖反応が生じる。

臨界状態の一解釈

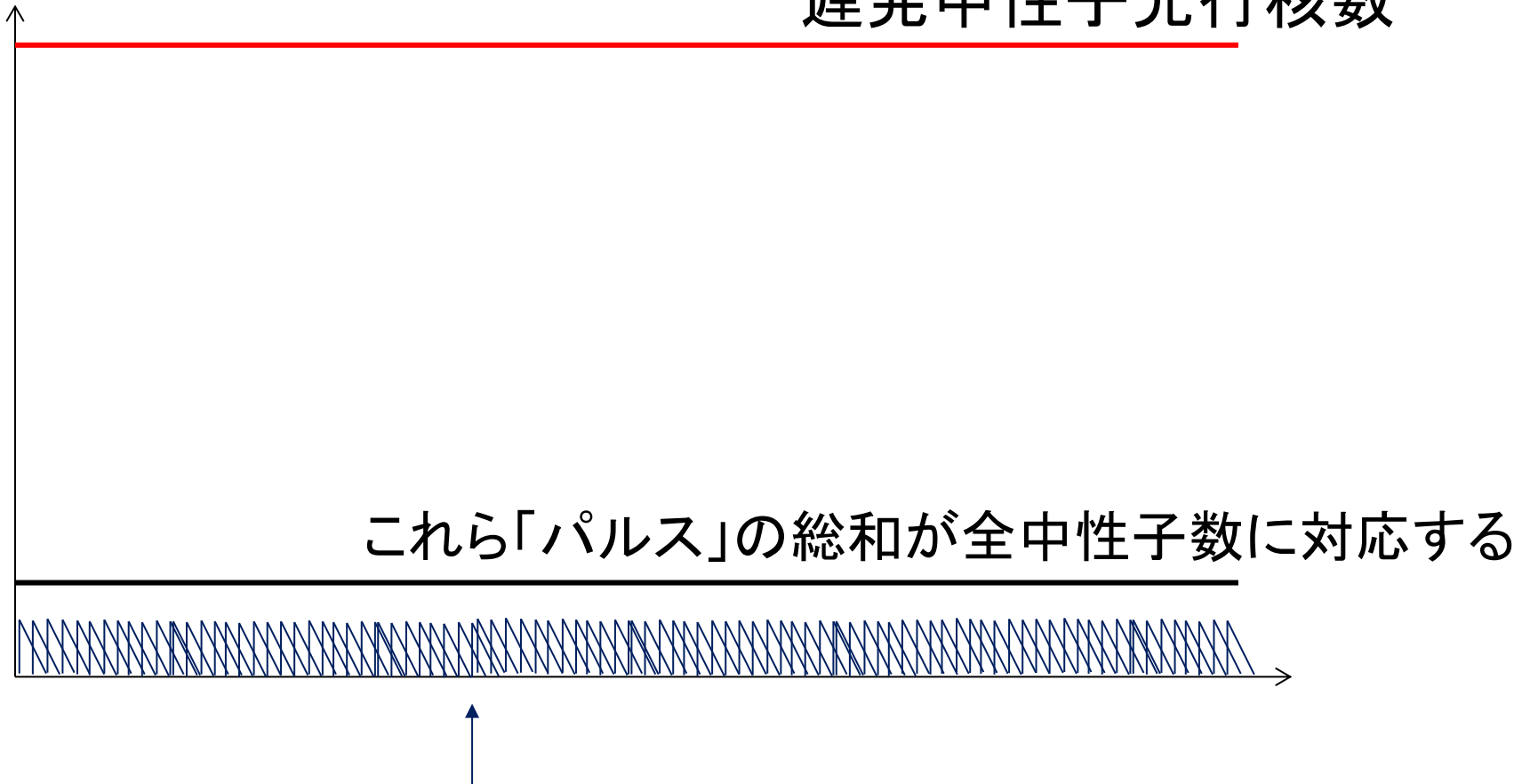
遅発中性子先行核数



燃料中には大量の遅発中性子先行核が存在しているのでこのような「パルス」が連続的に発生していると考えてよい。

臨界状態の一解釈

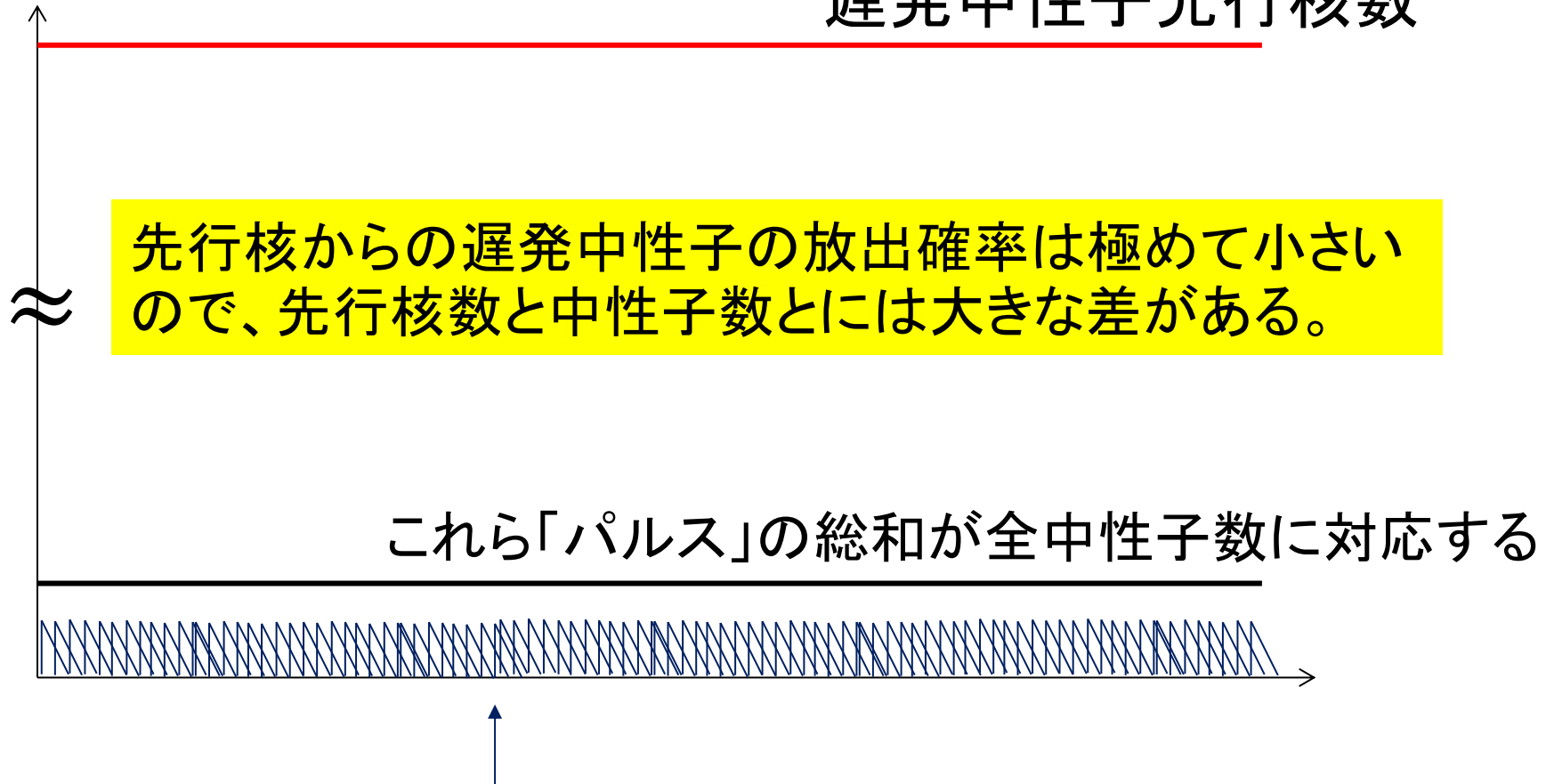
遅発中性子先行核数



燃料中には大量の遅発中性子先行核が存在しているのでこのような「パルス」が連続的に発生していると考えてよい。

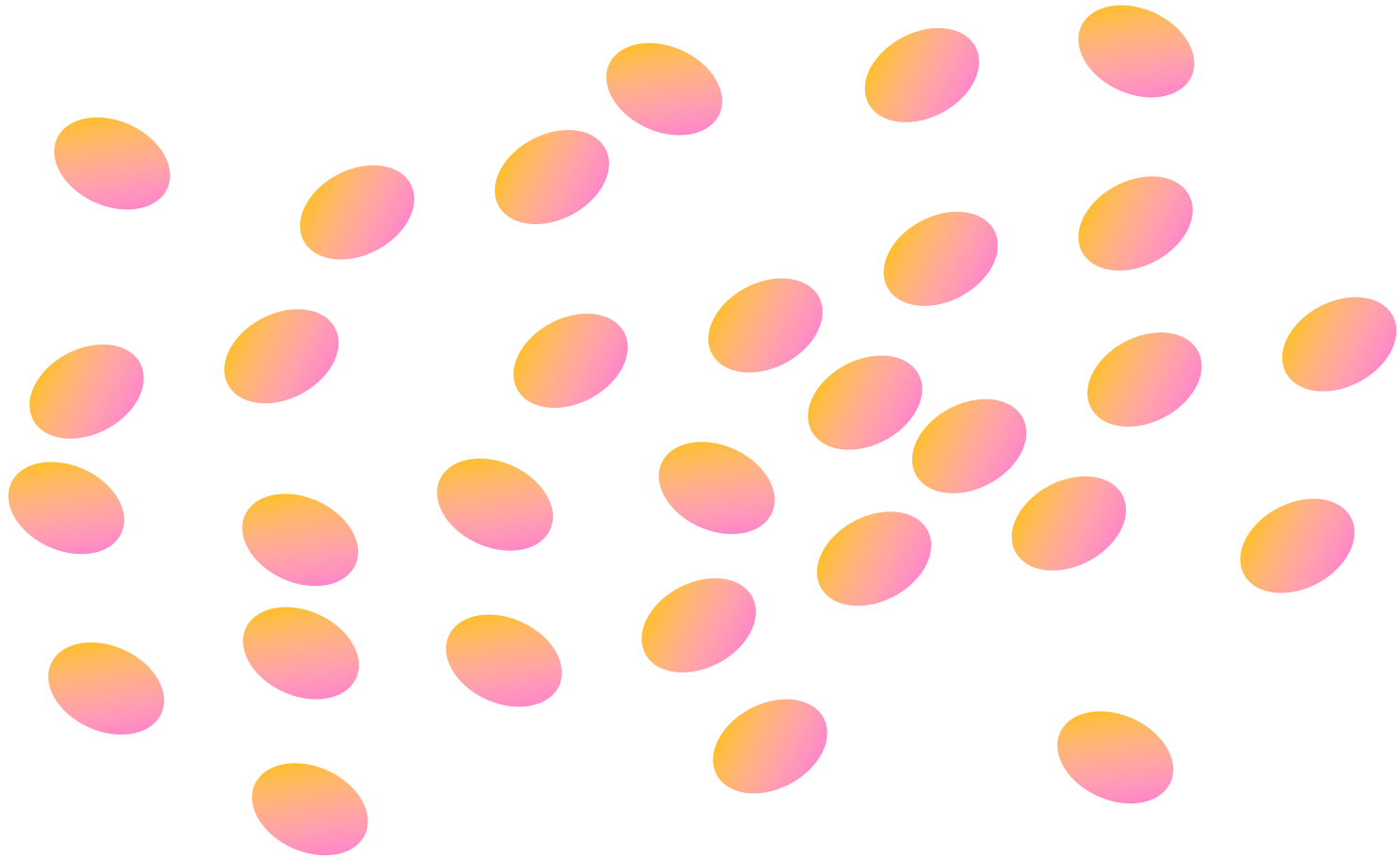
臨界状態の一解釈

遅発中性子先行核数



燃料中には大量の遅発中性子先行核が存在しているのでこのような「パルス」が連続的に発生していると考えてよい。

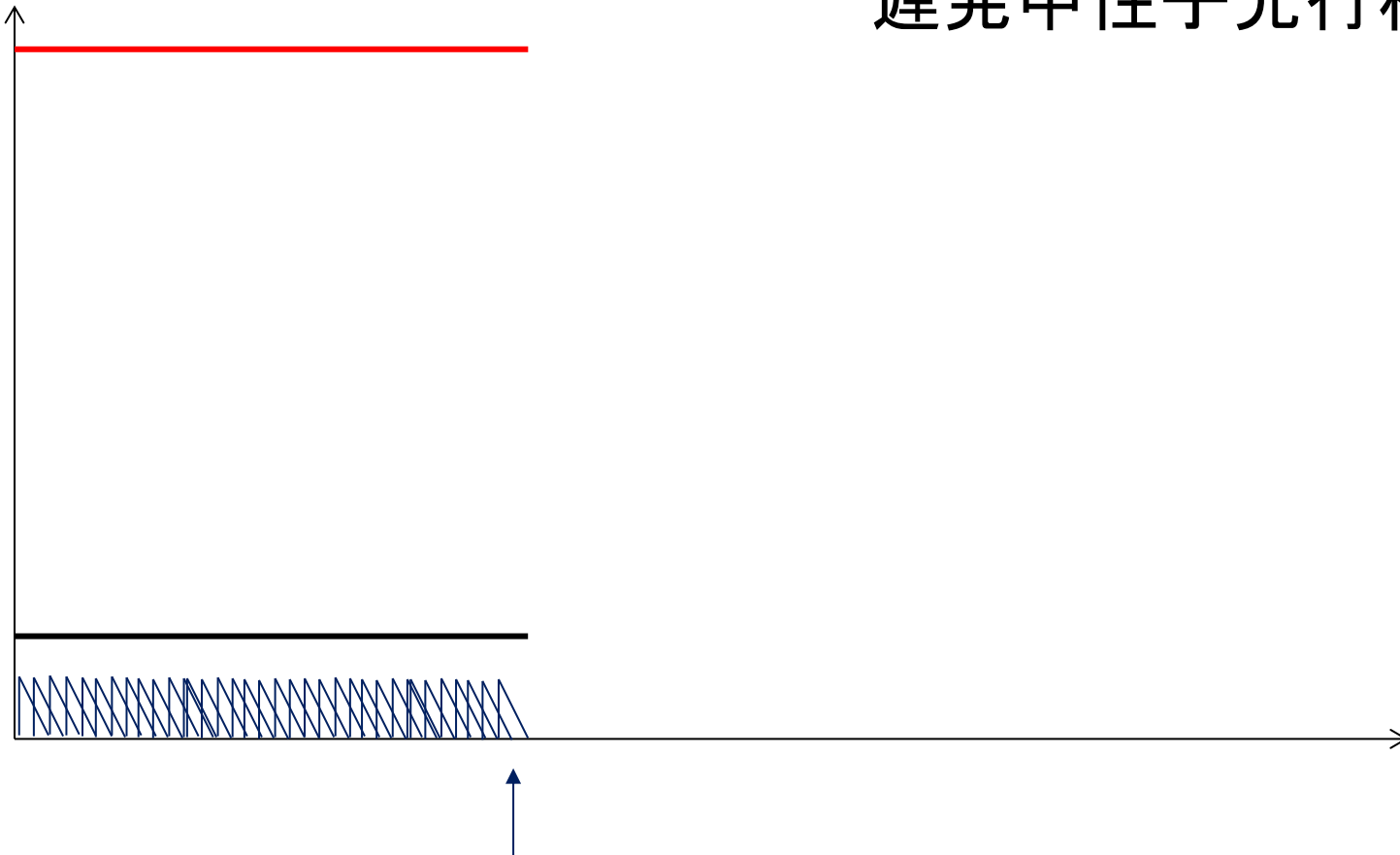
臨界状態の一解釈



臨界状態とは、「膨大な数の先行核が存在し、それらが少しずつ遅発中性子を放出し、それによる未臨界連鎖反応で発生する中性子の総和が一定になっている状態」と解釈できる。

臨界状態から僅かに臨界超過とした場合

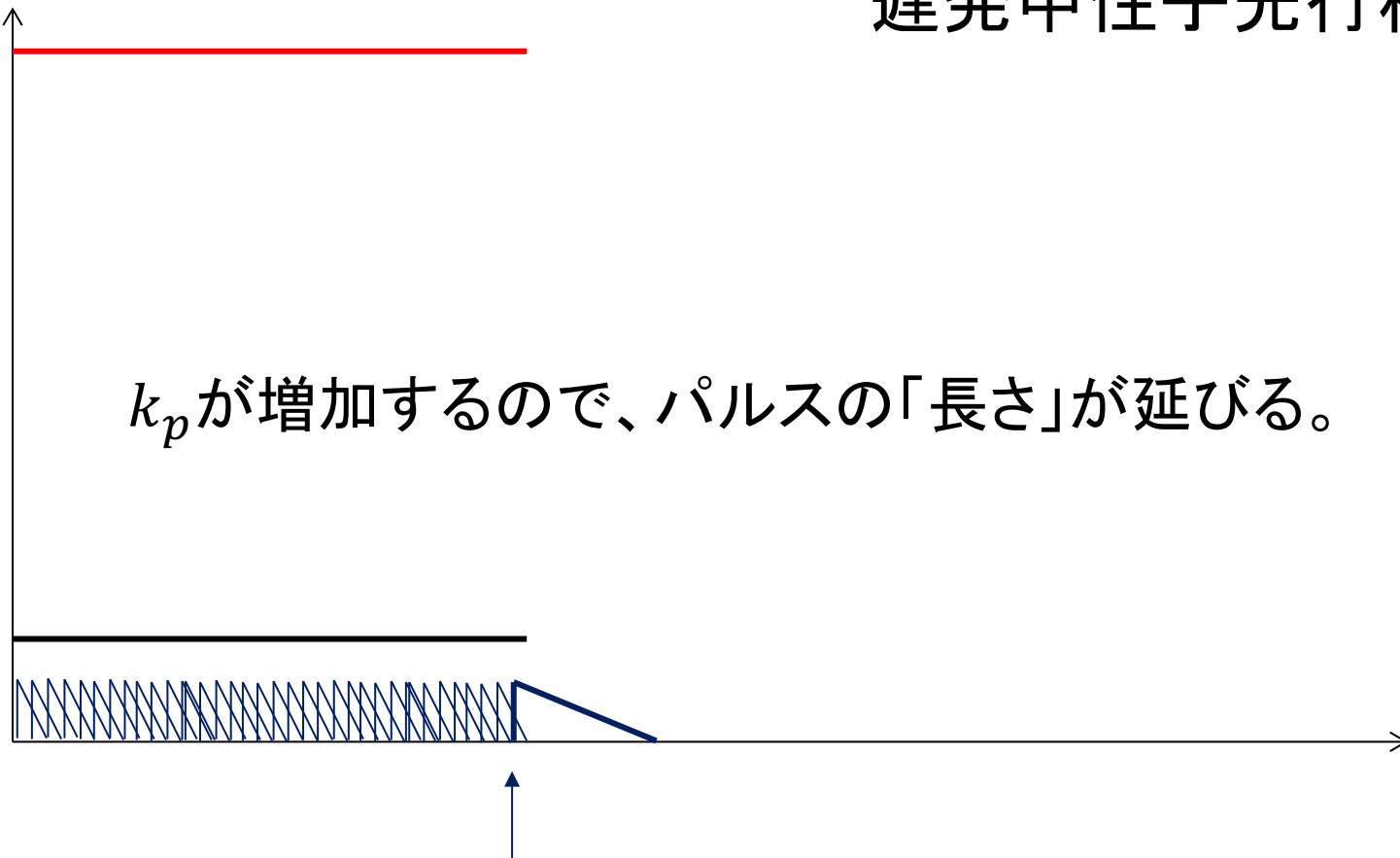
遅発中性子先行核数



この時点で原子炉をわずかに臨界超過にしたらどうなるだろうか？
ただし、 $k_p < 1$ のままとする。

臨界状態から僅かに臨界超過とした場合

遅発中性子先行核数

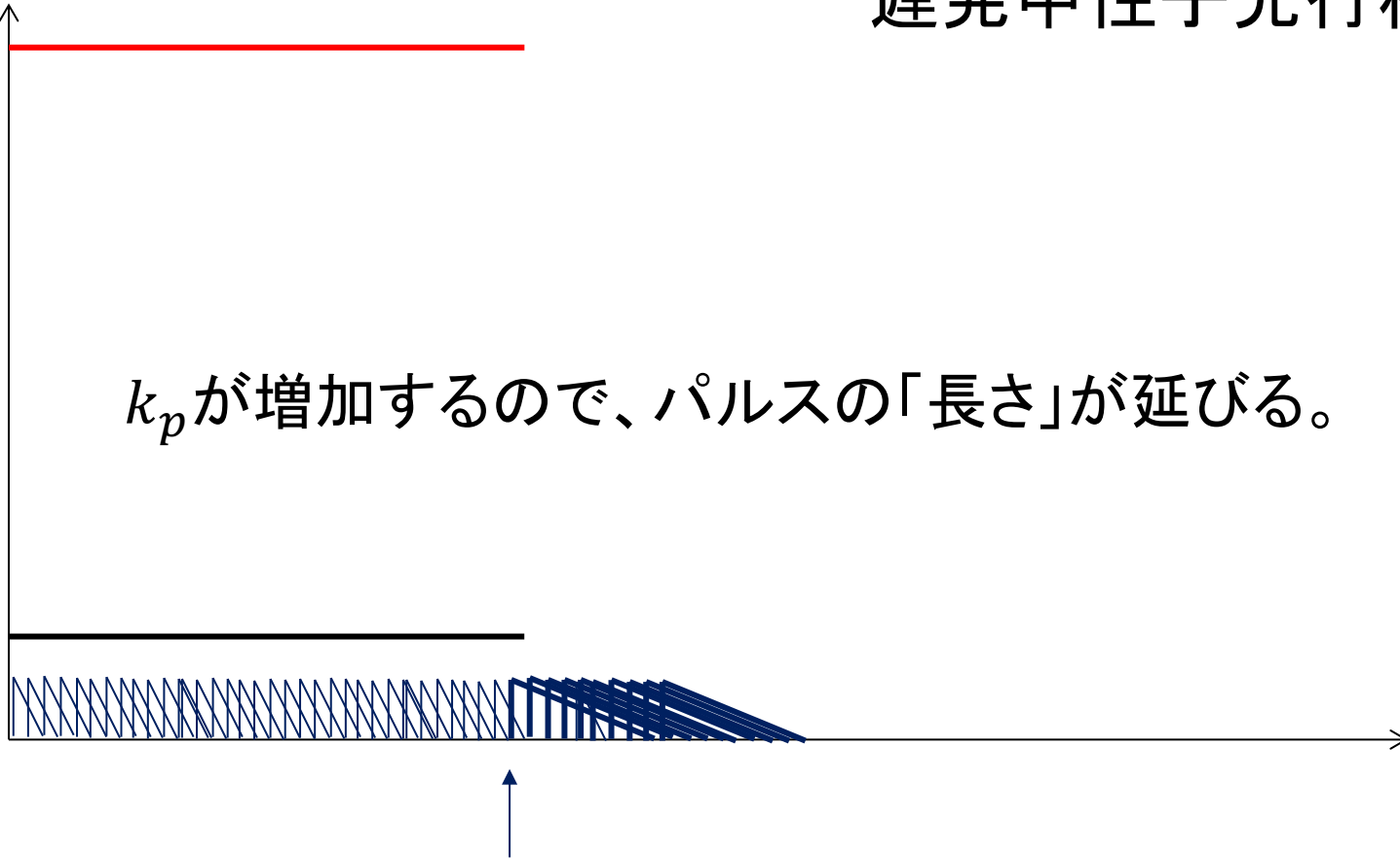


この時点で原子炉をわずかに臨界超過にしたらどうなるだろうか？
ただし、 $k_p < 1$ のままとする。

臨界状態から僅かに臨界超過とした場合

遅発中性子先行核数

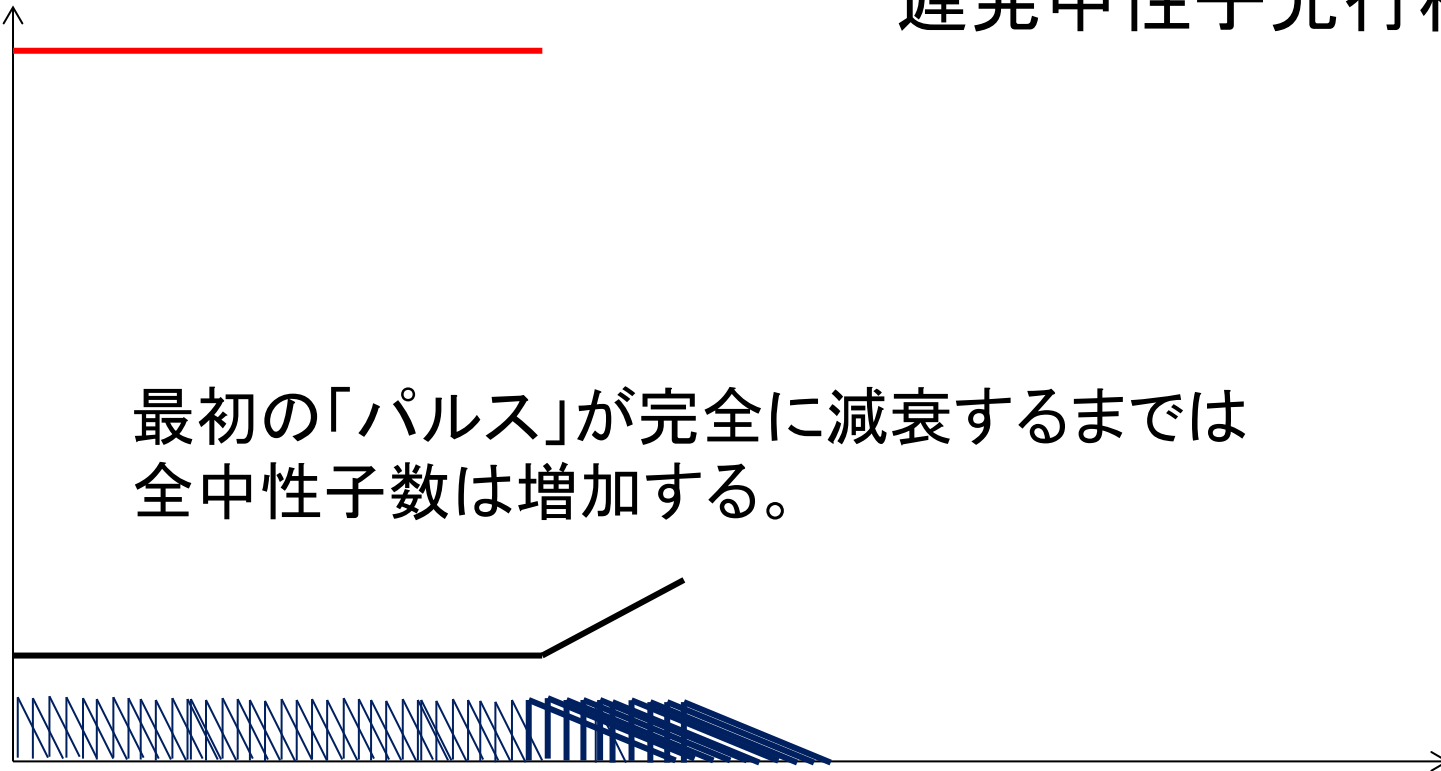
k_p が増加するので、パルスの「長さ」が延びる。



この時点で原子炉をわずかに臨界超過にしたらどうなるだろうか？
ただし、 $k_p < 1$ のままとする。

臨界状態から僅かに臨界超過とした場合

遅発中性子先行核数

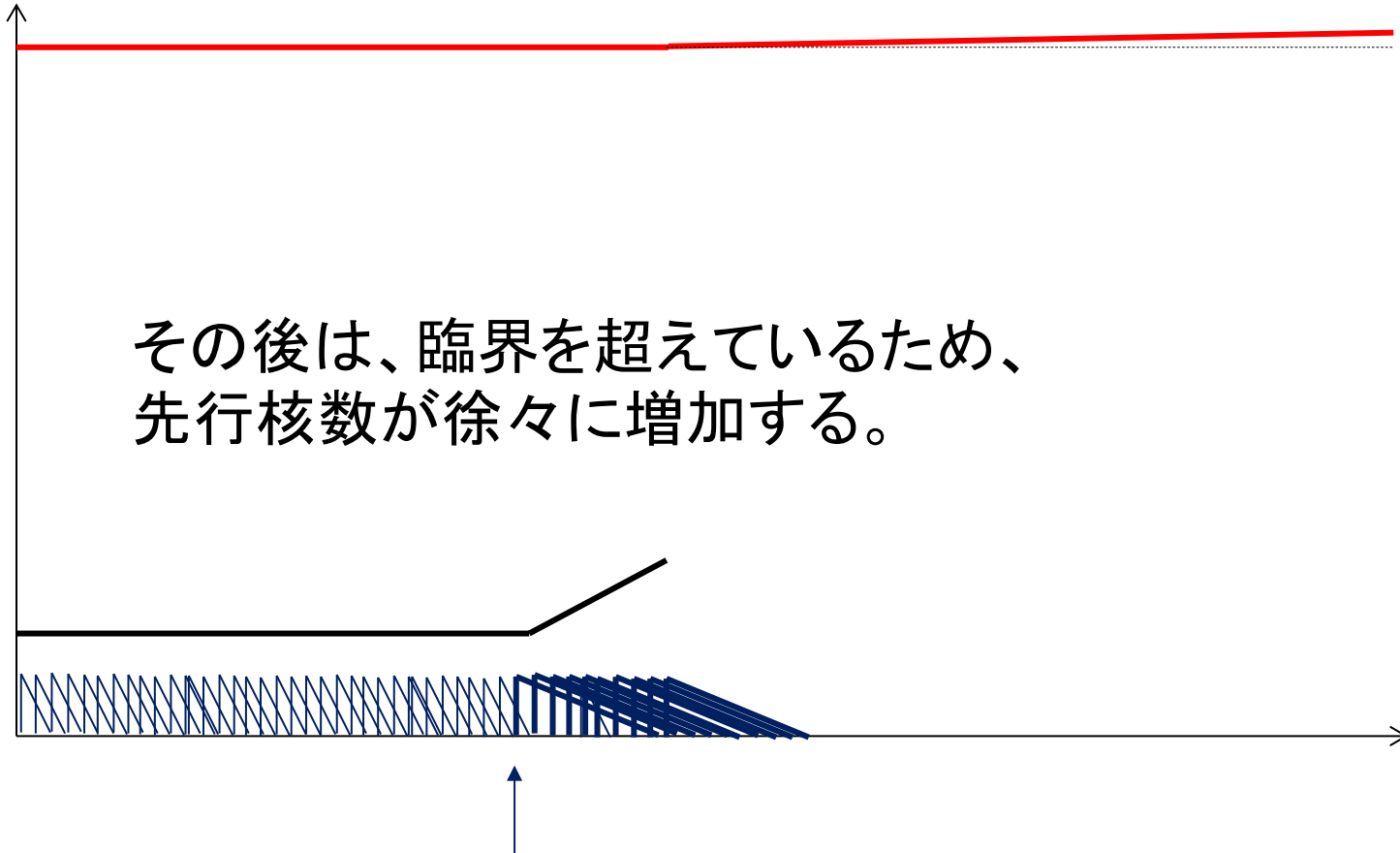


最初の「パルス」が完全に減衰するまでは
全中性子数は増加する。

↑
この時点で原子炉をわずかに臨界超過
にしたらどうなるだろうか？
ただし、 $k_p < 1$ のままとする。

臨界状態から僅かに臨界超過とした場合

遅発中性子先行核数



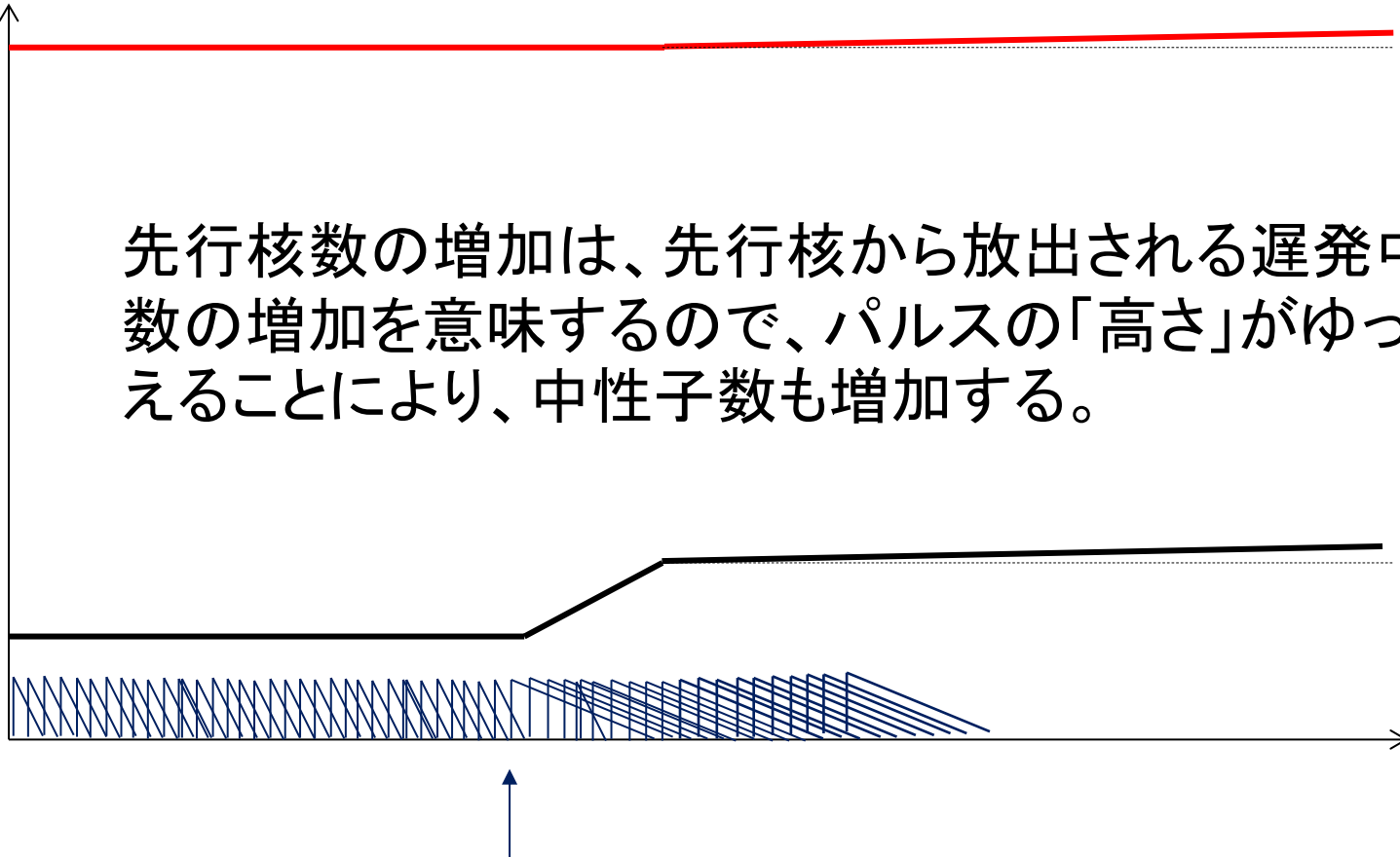
その後は、臨界を超えているため、先行核数が徐々に増加する。

この時点で原子炉をわずかに臨界超過にしたらどうなるだろうか？
ただし、 $k_p < 1$ のままとする。

臨界状態から僅かに臨界超過とした場合

遅発中性子先行核数

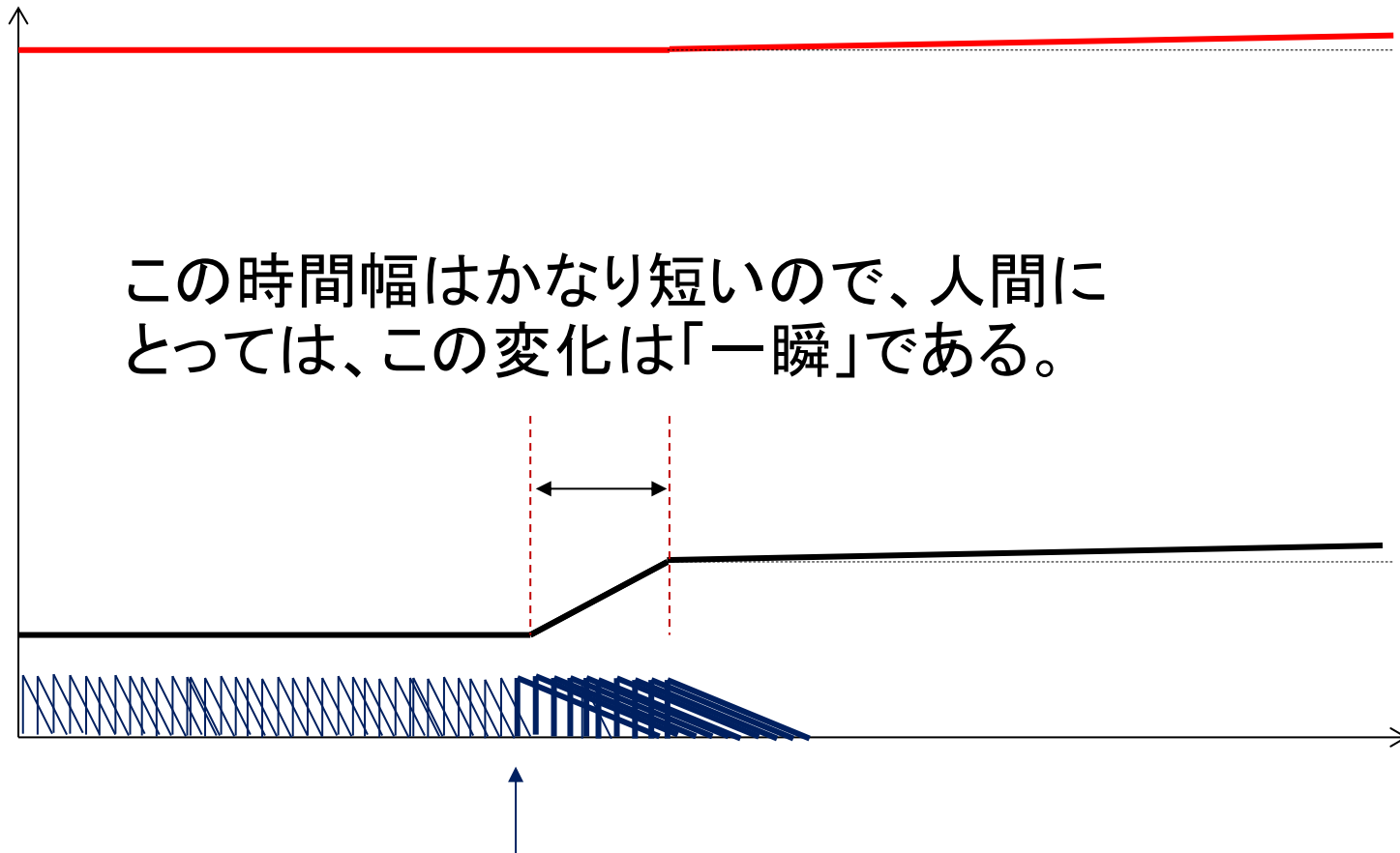
先行核数の増加は、先行核から放出される遅発中性子数の増加を意味するので、パルスの「高さ」がゆっくり増えることにより、中性子数も増加する。



この時点で原子炉をわずかに臨界超過にしたらどうなるだろうか？
ただし、 $k_p < 1$ のままとする。

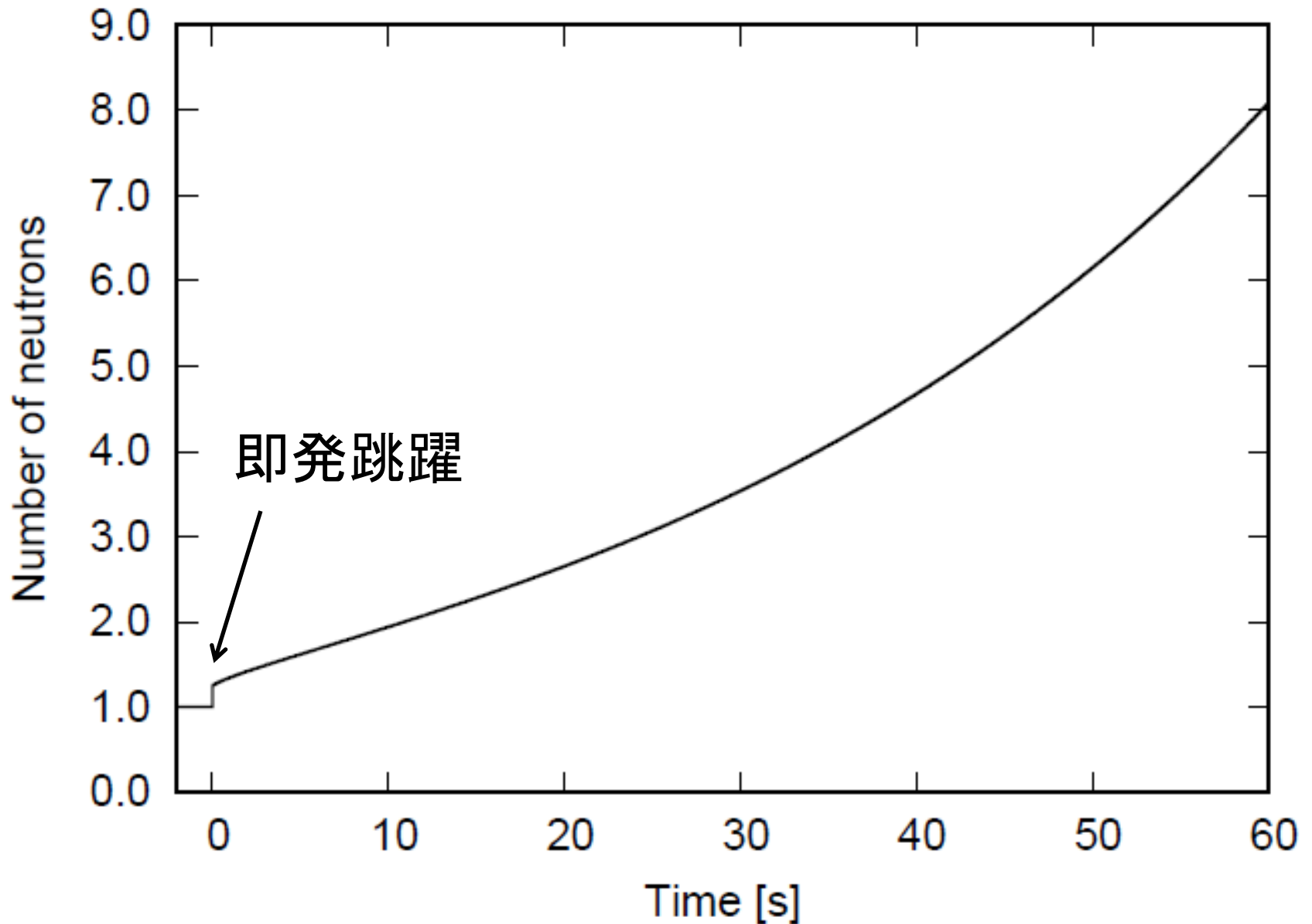
臨界状態から僅かに臨界超過とした場合

遅発中性子先行核数

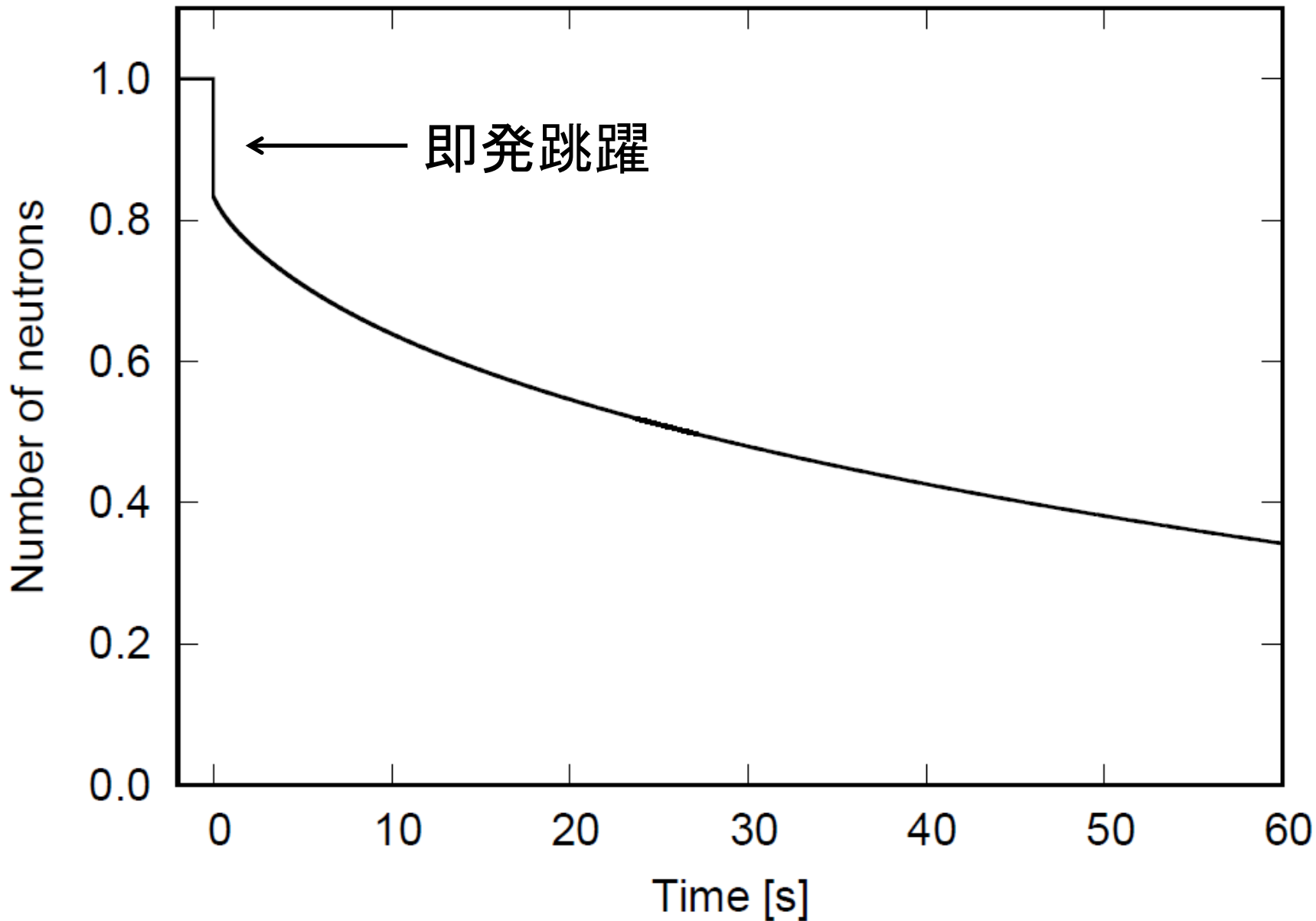


この時点で原子炉をわずかに臨界超過にしたらどうなるだろうか？
ただし、 $k_p < 1$ のままとする。

臨界状態から僅かに臨界超過とした場合

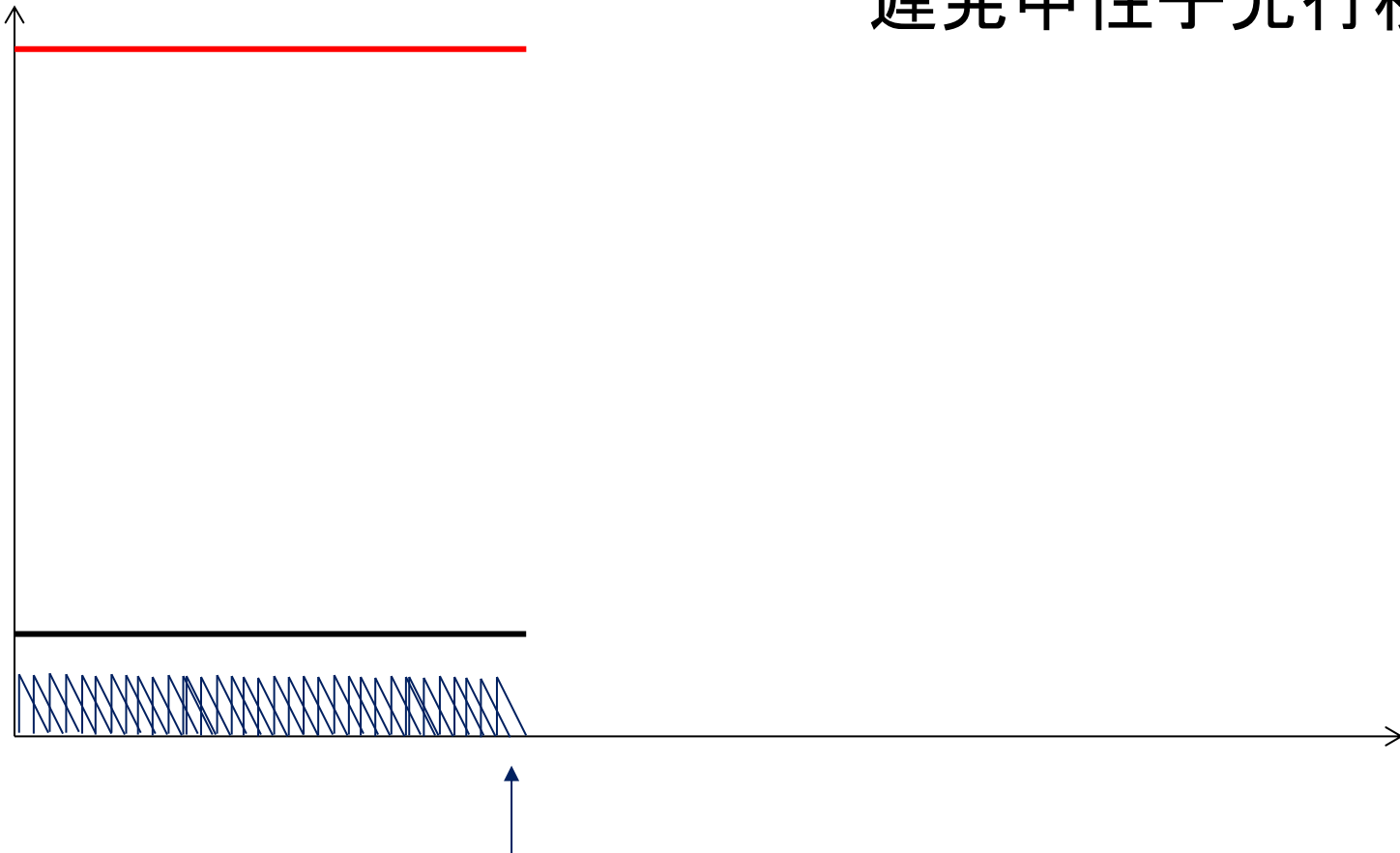


臨界状態から僅かに未臨界とした場合



臨界状態から大きく臨界超過とした場合

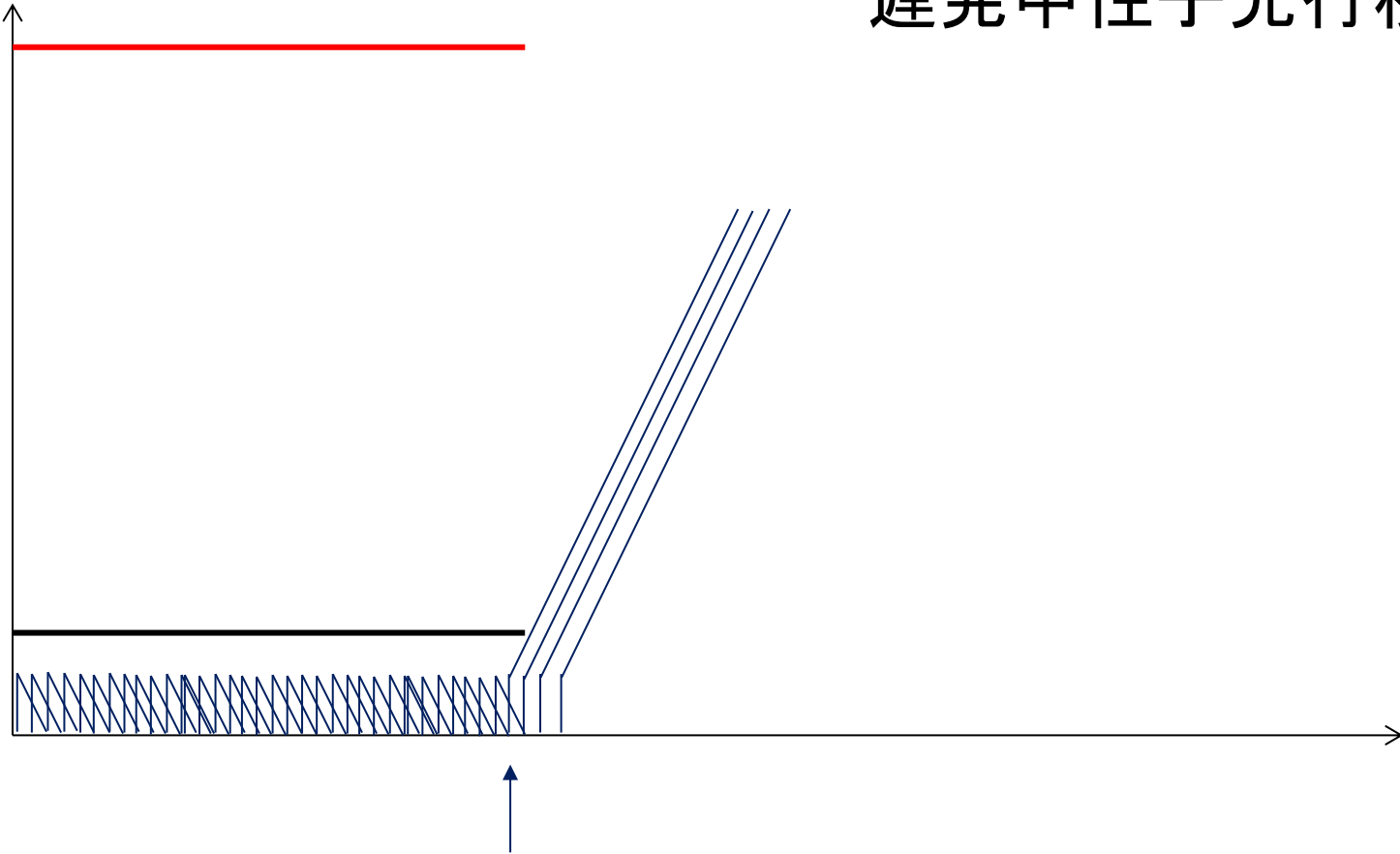
遅発中性子先行核数



この時点で原子炉を大きく臨界超過
($k_p > 1$)にしたらどうなるだろうか？

臨界状態から大きく臨界超過とした場合

遅発中性子先行核数

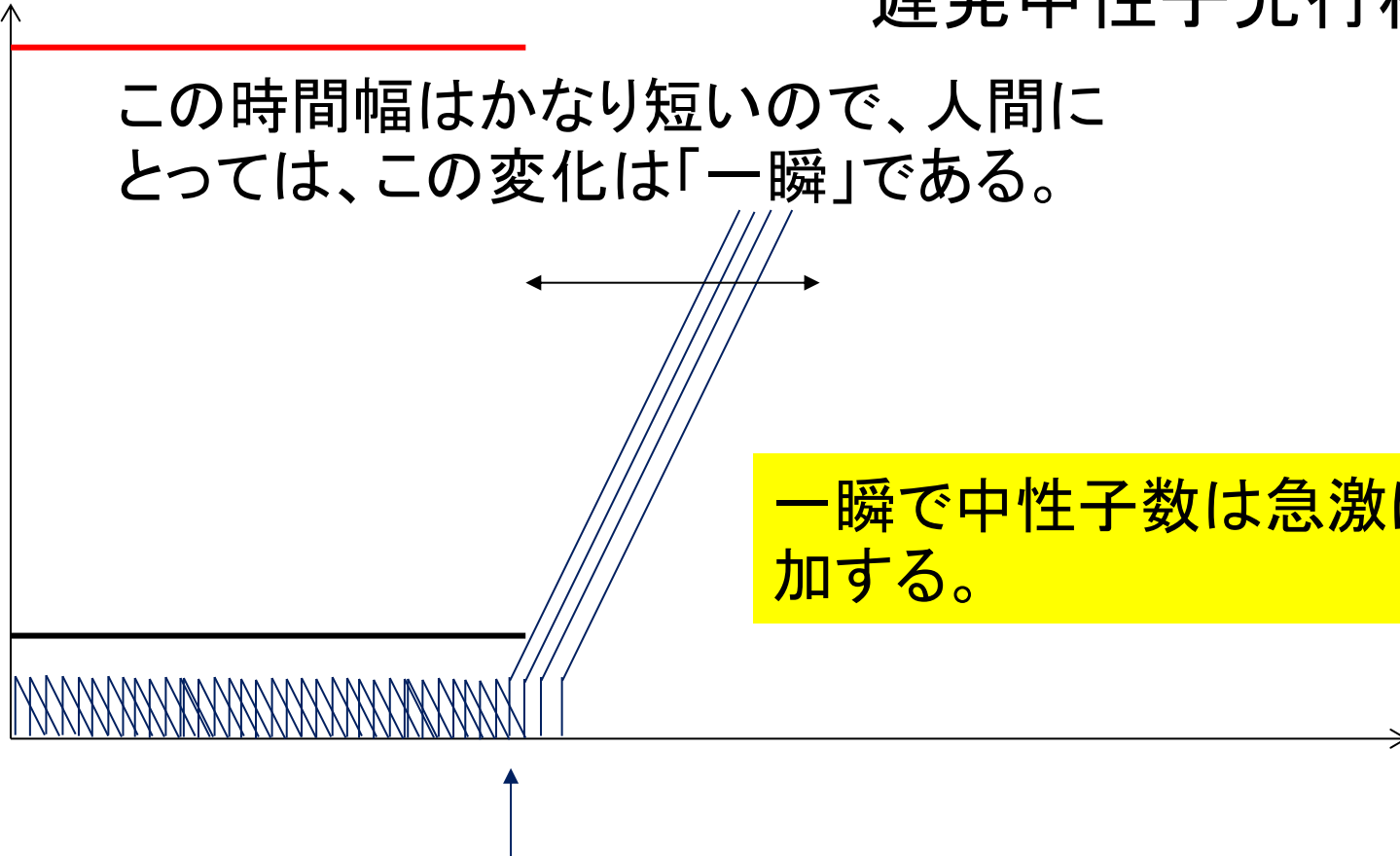


この時点で原子炉を大きく臨界超過
($k_p > 1$)にしたらどうなるだろうか？

臨界状態から大きく臨界超過とした場合

遅発中性子先行核数

この時間幅はかなり短いので、人間にとっては、この変化は「一瞬」である。

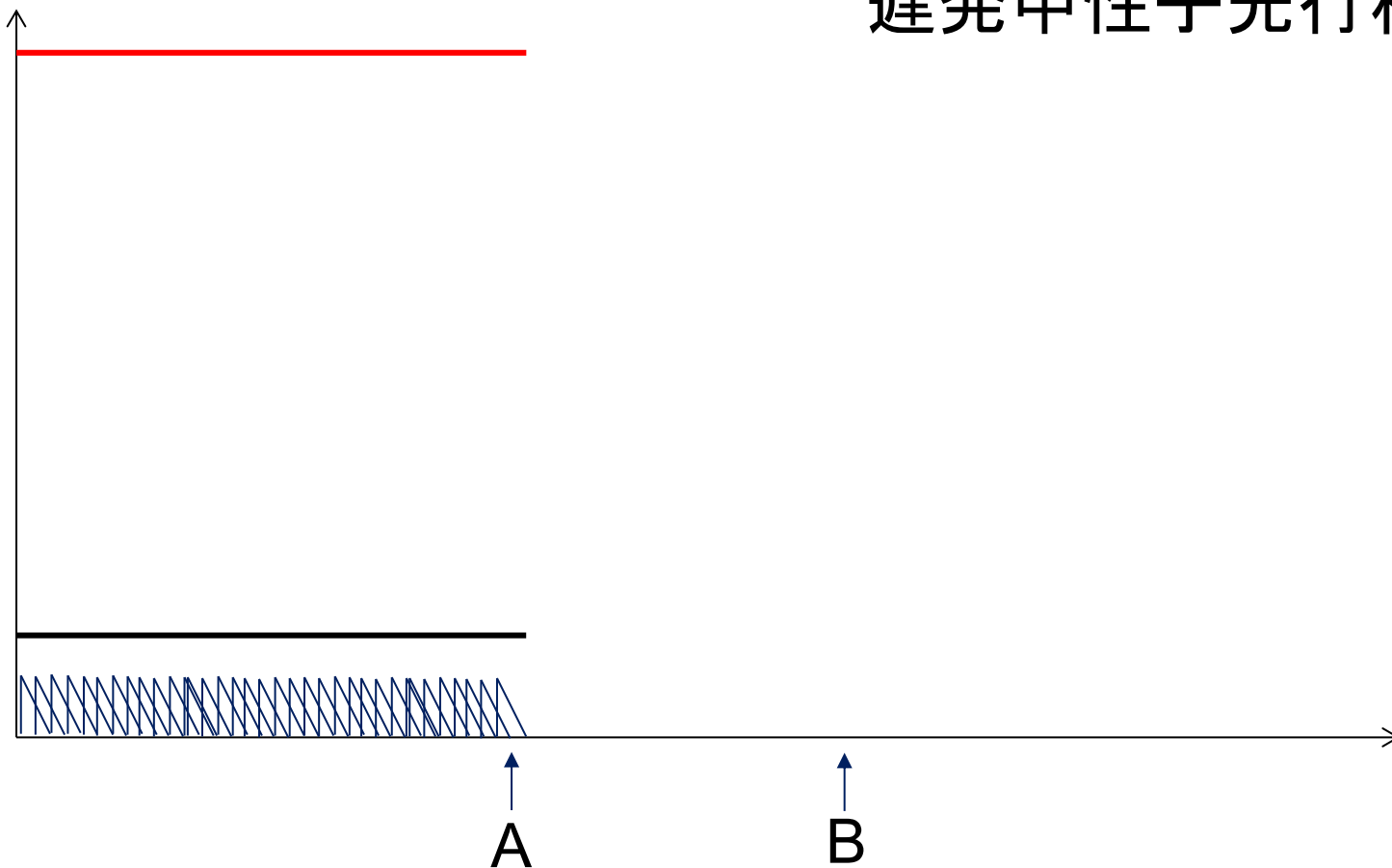


一瞬で中性子数は急激に増加する。

この時点で原子炉を大きく臨界超過 ($k_p > 1$) にしたらどうなるだろうか？

臨界状態から僅かに臨界超過として臨界に戻した場合

遅発中性子先行核数

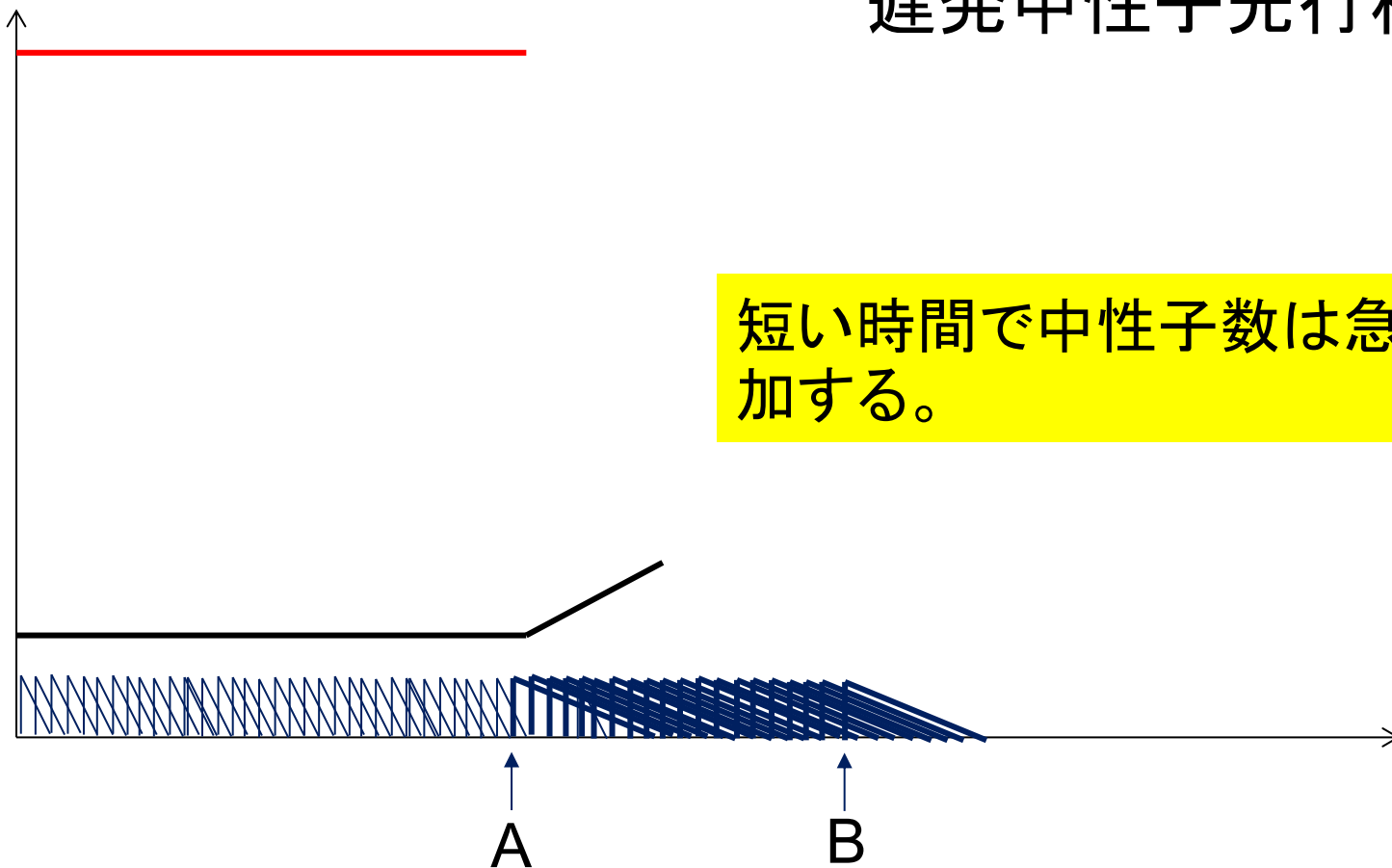


時間点Aで原子炉を僅かに臨界超過にして、時間点Bで臨界に戻したらどうなるだろうか？

常に臨界を超えているので、中性子数は増加し続けるか？

臨界状態から僅かに臨界超過として臨界に戻した場合

遅発中性子先行核数

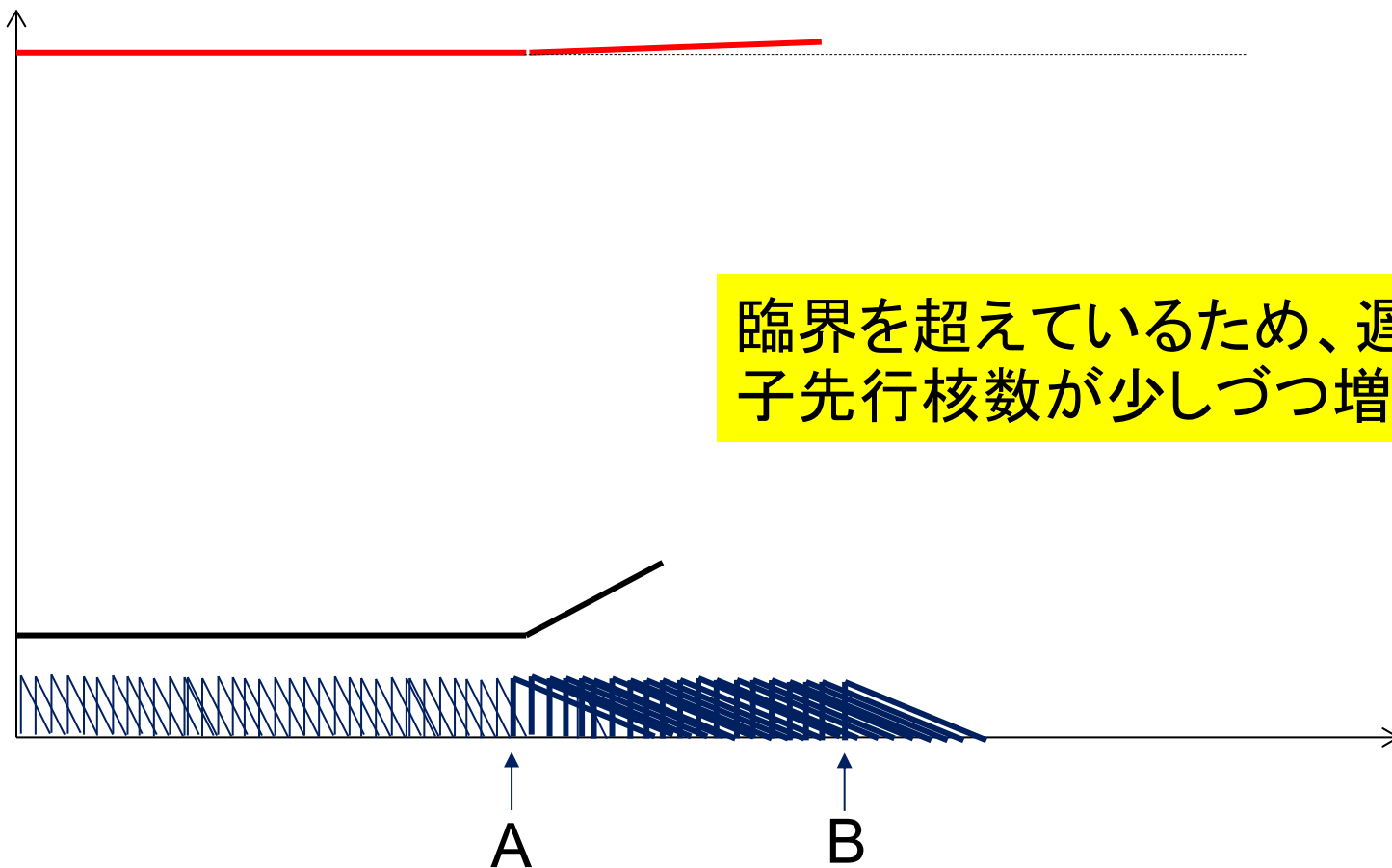


時間点Aで原子炉を僅かに臨界超過にして、時間点Bで臨界に戻したらどうなるだろうか？

常に臨界を超えているので、中性子数は増加し続けるか？

臨界状態から僅かに臨界超過として臨界に戻した場合

遅発中性子先行核数

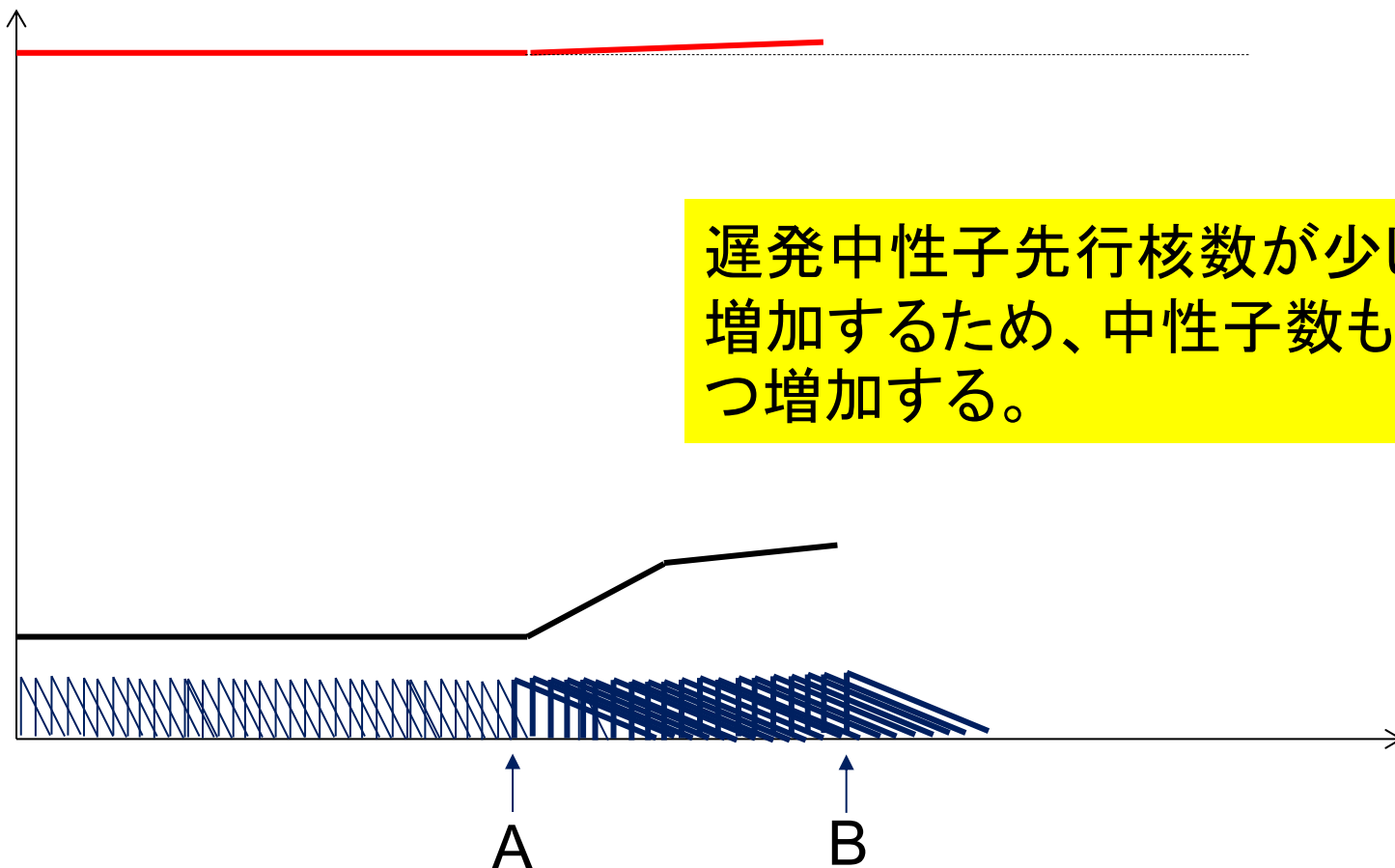


臨界を超えているため、遅発中性子先行核数が少しずつ増加する。

時間点Aで原子炉を僅かに臨界超過にして、時間点Bで臨界に戻したらどうなるだろうか？
常に臨界を超えているので、中性子数は増加し続けるか？

臨界状態から僅かに臨界超過として臨界に戻した場合

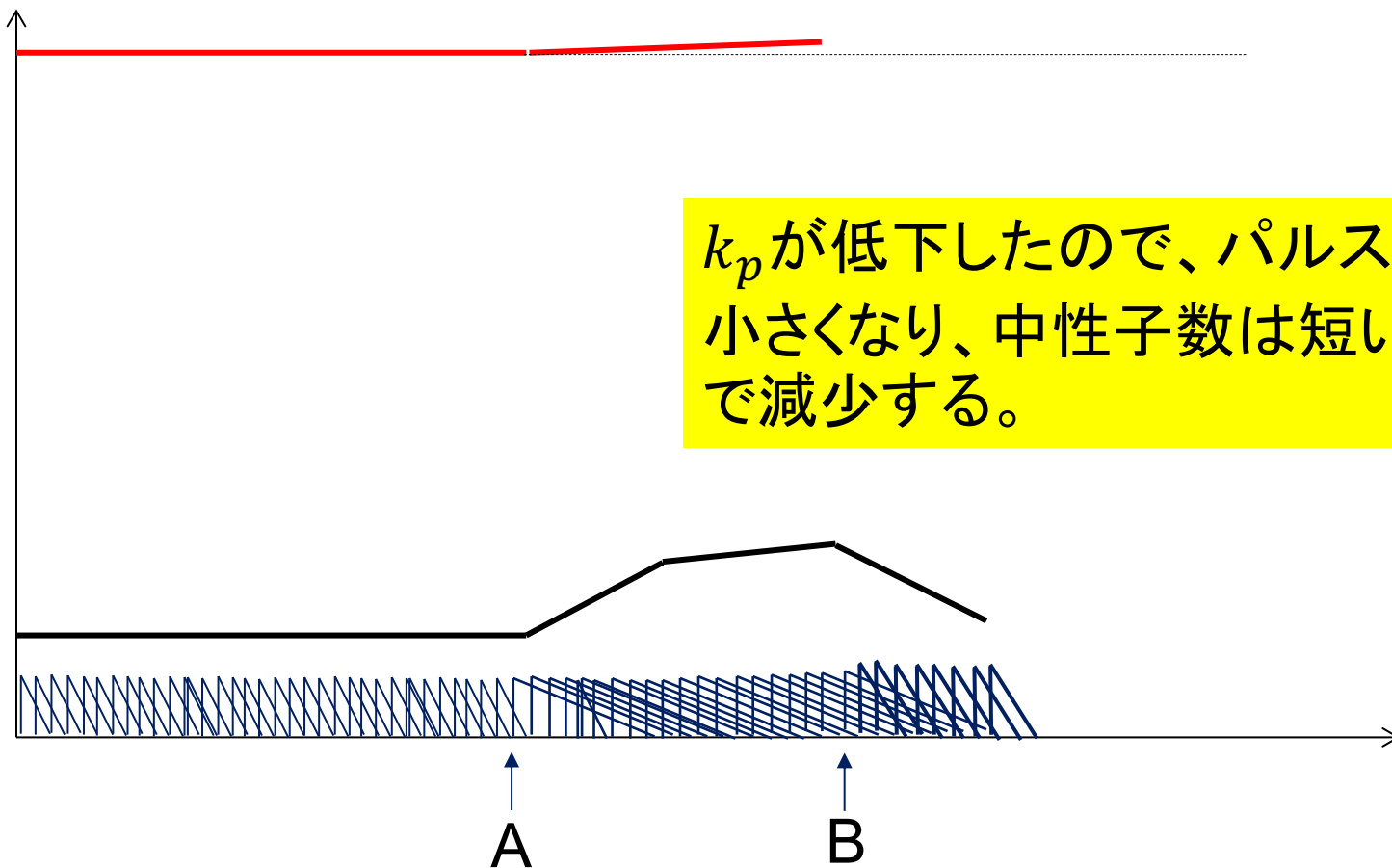
遅発中性子先行核数



時間点Aで原子炉を僅かに臨界超過にして、時間点Bで臨界に戻したらどうなるだろうか？
常に臨界を超えているので、中性子数は増加し続けるか？

臨界状態から僅かに臨界超過として臨界に戻した場合

遅発中性子先行核数

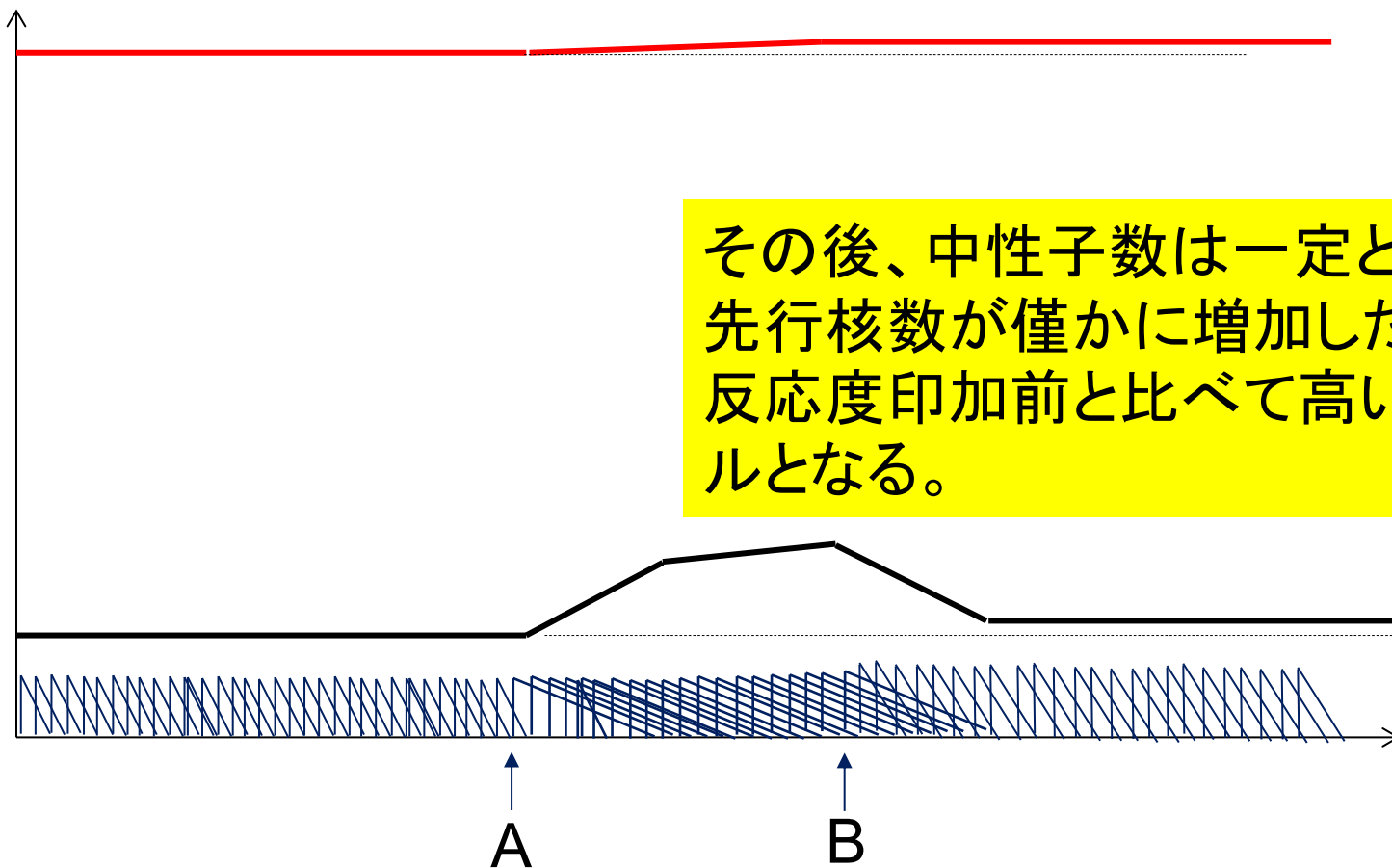


時間点Aで原子炉を僅かに臨界超過にして、時間点Bで臨界に戻したらどうなるだろうか？

常に臨界を超えているので、中性子数は増加し続けるか？

臨界状態から僅かに臨界超過として臨界に戻した場合

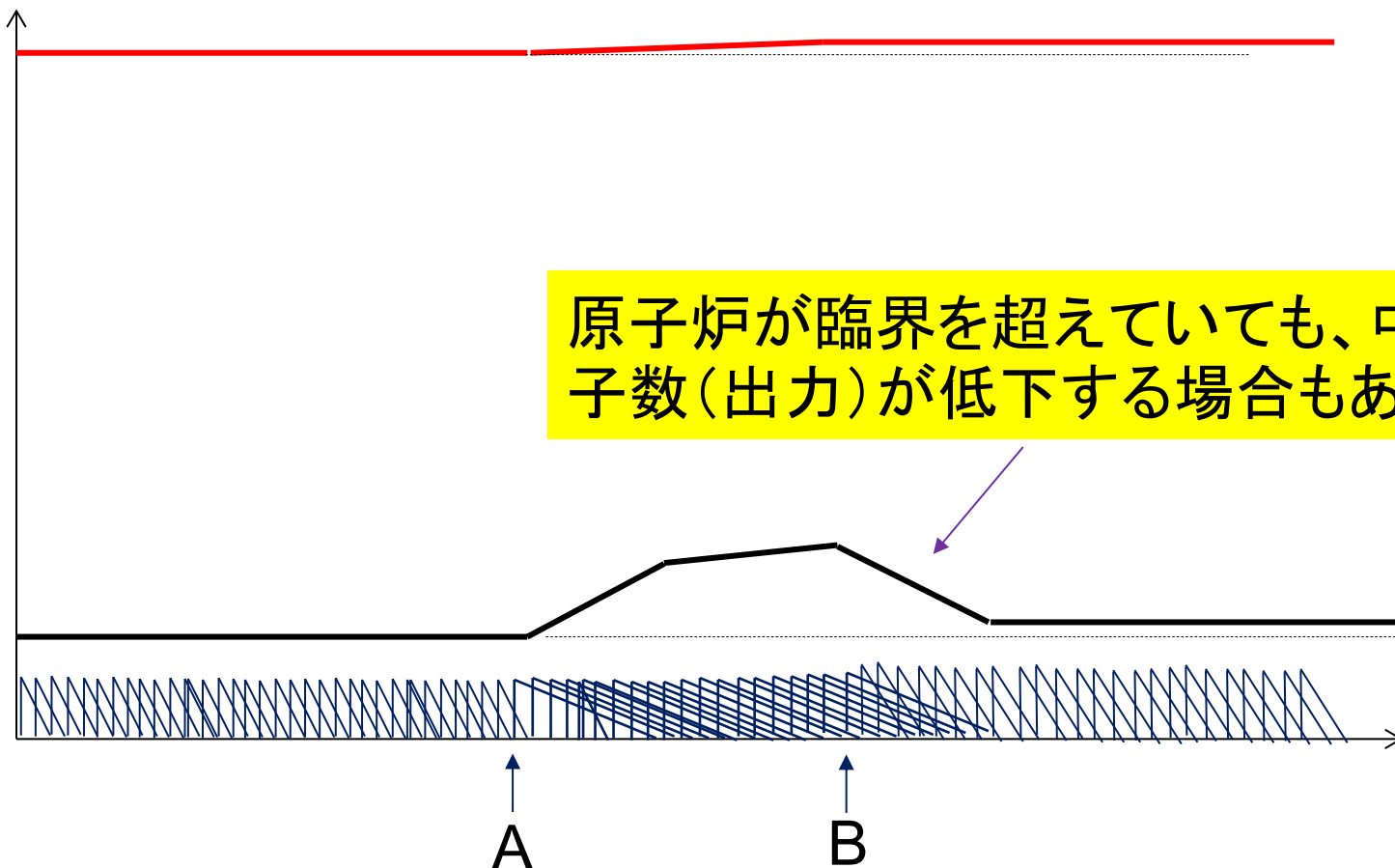
遅発中性子先行核数



時間点Aで原子炉を僅かに臨界超過にして、時間点Bで臨界に戻したらどうなるだろうか？
常に臨界を超えているので、中性子数は増加し続けるか？

臨界状態から僅かに臨界超過として臨界に戻した場合

遅発中性子先行核数



時間点Aで原子炉を僅かに臨界超過にして、時間点Bで臨界に戻したらどうなるだろうか？

常に臨界を超えているので、中性子数は増加し続けるか？