

産業応用セッション:

金属結晶閉じ込め型核融合炉

Metal Crystal confinement Fusion Reactor

大山パワー株式会社/大山和男

2023.12.3 JCF24 資料

磁気閉じ込め型核融合炉

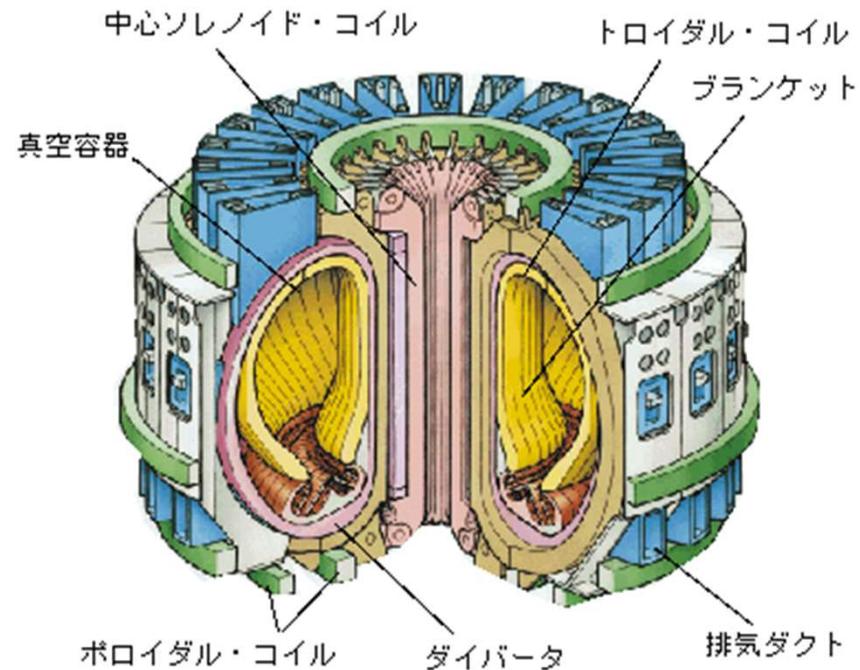
現在目指している核融合炉

Magnetic confinement fusion reactor

色々課題があり実現性に疑問

課題

1. プラズマ保持のために投入する電力が大きい。(超高温のプラズマを閉じ込めため超電導磁石が必要で、この超電導磁石を極低温にするための電力損失が大きい。)
2. プラズマと接する内壁材料の冷却と耐久性、及び発生中性子による放射性物質化。
3. プラズマへの不純物の入り込み。
4. 燃料トリチウムの再生産。(ブラケット内に ${}^6\text{Li}$ を置き、中性子を当てて燃料トリチウムを生成し、後に回収する。)



日本原子力研究所・那珂研究所・炉心プラズマ研究部：核融合をめざして－融合研究開発の現状1996年11月、p10

金属結晶閉じ込め型核融合炉は磁気閉じ込め型核融合炉と比べ課題が少なく、小型化可能で、未来の人類のエネルギー源になり得る。

S. Pons と M. Fleischmann 何をやり、何を見たのか?

①1989年の最初の論文
装置等の記載なく、何をやったのか分からず、論文として出来が悪い。

Martin Fleischmann, Stanley Pons, "Electrochemically induced nuclear fusion of deuterium" J. Electroanal. Chem., 1989. 261: p. 301 and errata in Vol. 263.

「陰極のかなりの部分が溶け(融点 1544°C)、その一部が蒸発し、実験を収容するセルと内容物とガス箱の一部が破壊された。」の記述があり、文中に
「(a)過剰エンタルピー発生は印加される電流密度に著しく依存し、電極の体積に比例する」の記載がある。

PdにDを多く入れる方向にミスリードしてしまった。

②2004年の「死後の熱」の論文

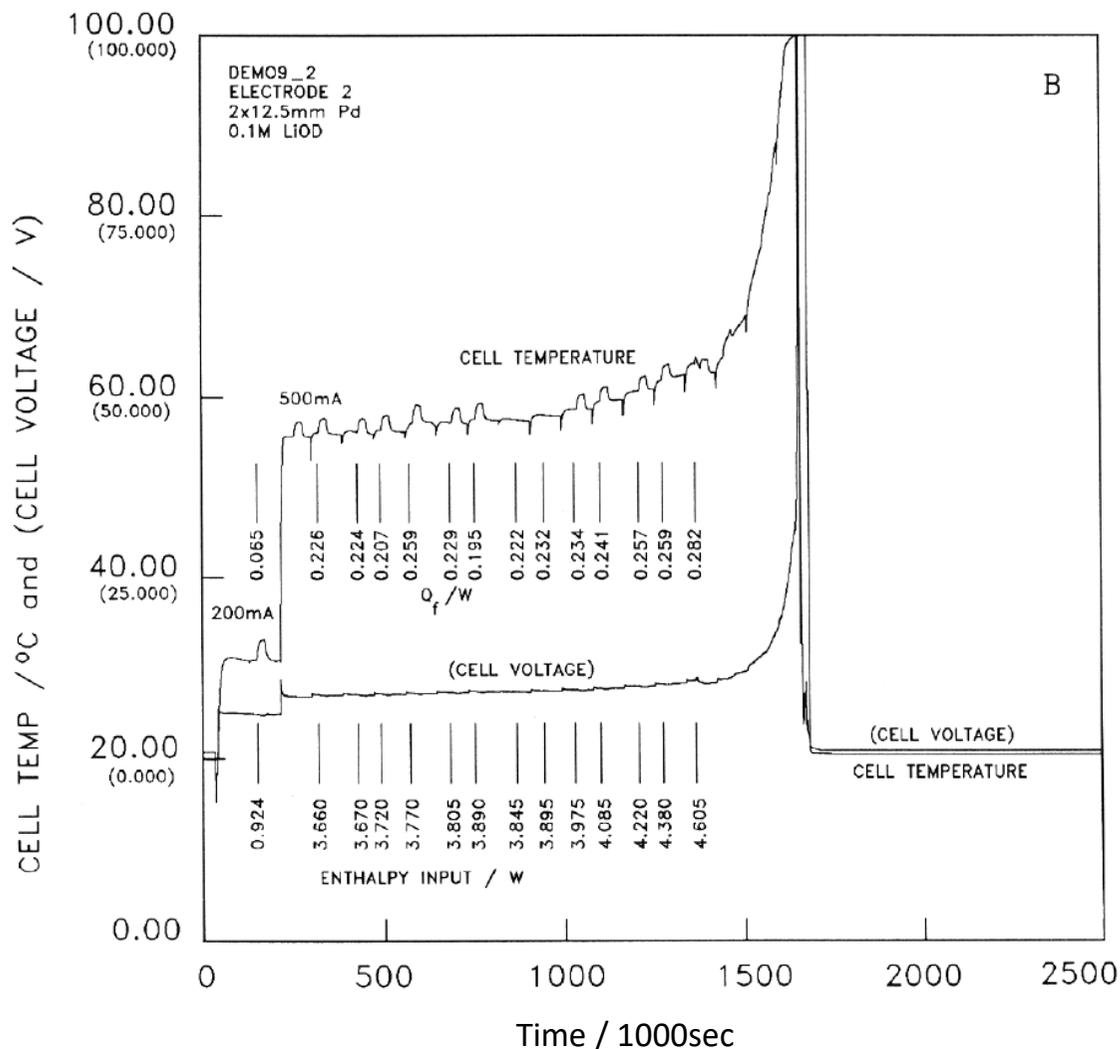
S. Pons and M. Fleischmann "HEAT AFTER DEATH",
Proceedings ICCF4, 8-1 (1994)

1989年の発表から5年が経過し、何が重要かを見直した重要なレポートである。

電解液が蒸発し、電流が流れない状態になってから、約3時間、Pd陰極が高温状態を維持した。

この『死後の熱』こそ人類のエネルギー源になり得ることを示唆する重要な現象

「死後の熱」の論文から1993年の論文に振り返る



Martin Fleischmann and Stanley Pons in: Frontiers of Cold Fusion: Proceedings of the Third International Conference on Cold Fusion, Nagoya, Japan (21-25 October 1992), ed. H. Ikegami, Frontiers Science Series No. 4 (FSS-4) p.47.

Galvanostatic(定電流制御装置)を用いて、最終的には100Vまで電圧を上げ、電解液を蒸発させている。

4つのセルの並列電解実験

最初から0.500AのCellと、初期電流は0.200Aで、3日目、6日目、9日目にそれぞれ0.500Aに増加したCellの4つのCellを同時に電解した。

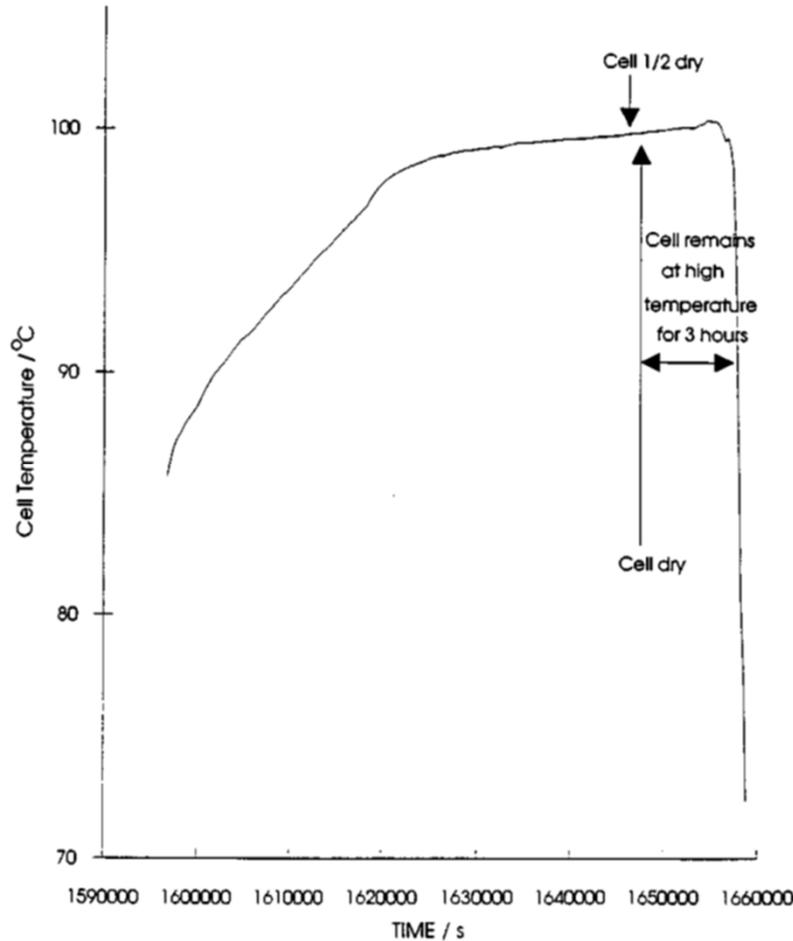
「死後の熱」を示したのは、3日目に0.500Aに増加したCellである。4600時間の電解の終了後の「死後の熱」が発生した。

最後は電極は水蒸気にくるまれ、放電によりセル温度が上がる状態になる。

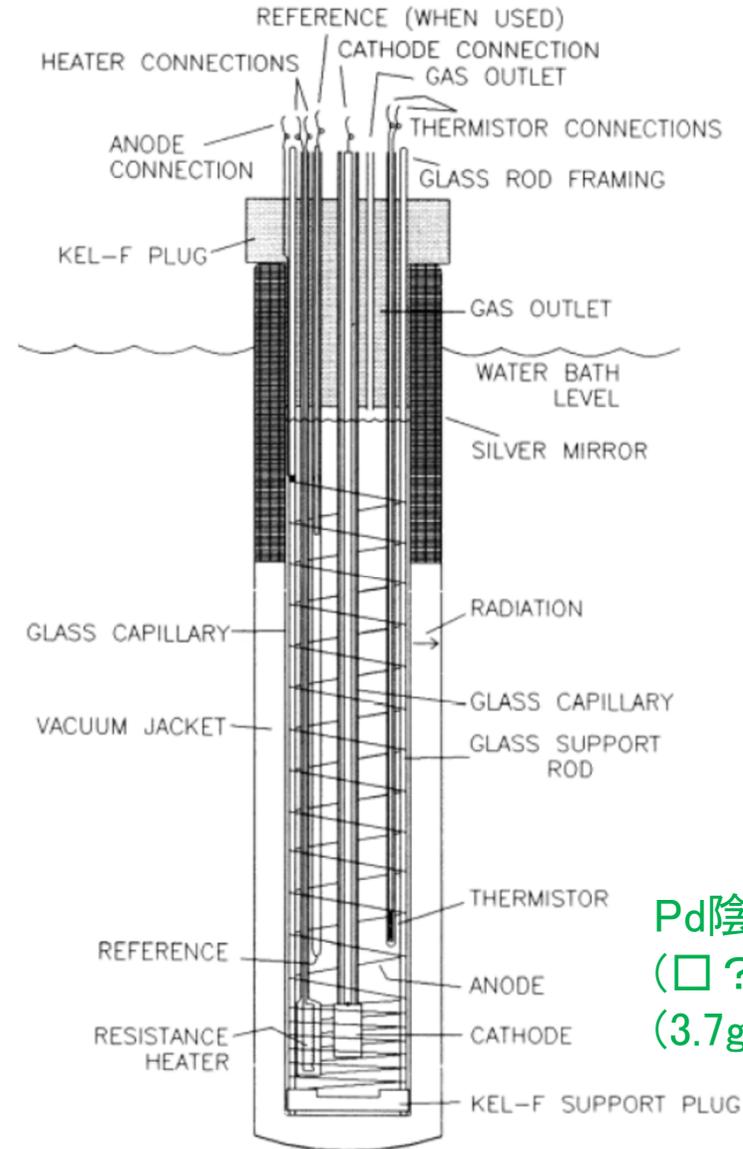
電解セルは解放型で、100°Cの時の内部ガスは水蒸気が主体で一部が空気で重水素ガスは少ないはずである。

この1994年の論文から1993年の論文に振り返る

電解の最後の60000sec(16.6h)



セル温度は2Wで9°C上昇するので、
少なくとも発熱量は17.5Wある。
⇒Pdの発熱は496W/mol以上
この発熱を継続させる



Pd陰極サイズは
(□?)12.5×L2:
(3.7g?)

Martin Fleischmann and Stanley Pons, "Calorimetry of the Pd-D₂O system: from simplicity via complications to simplicity." Physics Letters A 176 (1993) 118.

「死後の熱」はDの少ない α 相で生じる

100°Cの水素圧力が
大気圧より低ければ
 α' 相は生じない

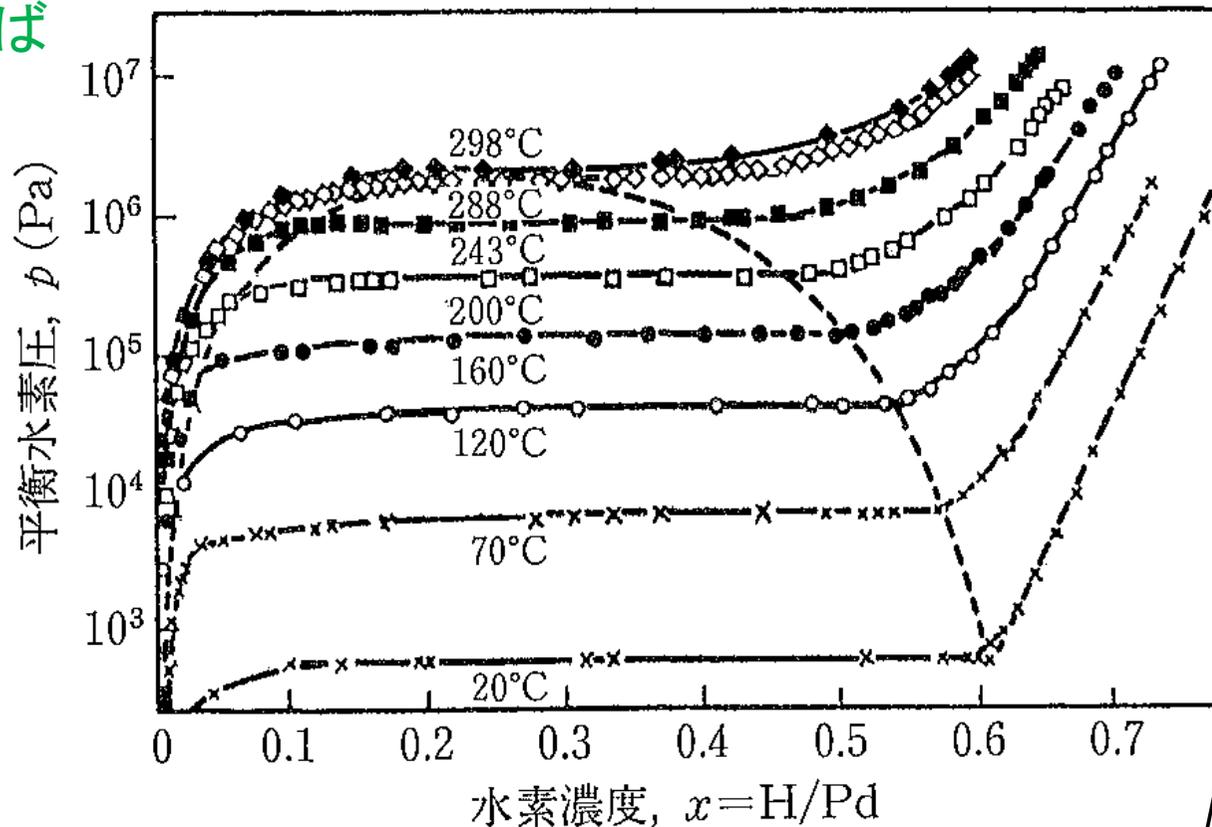


図 2.3 Pd-H系の $p-x-T$ 図. [E. Wicke and H. Brodowsky: Hydrogen in Metals II, G. Alefeld and J. Völkl, eds. (Springer, 1978), p. 81]

内田老鶴園 深井 有ら「金属と水素」p25

「死後の熱」はDの
少ない α 相で生じる

H/Pd=0.8
H:(Pd+H)=0.444

一般的なPd-H状態図(通常は大気圧)

600°C0.02barのときのPd
に対する水素の固溶量は
0.127mol%である。

水素圧力が上がら
ないと
 α' 相が生じない。

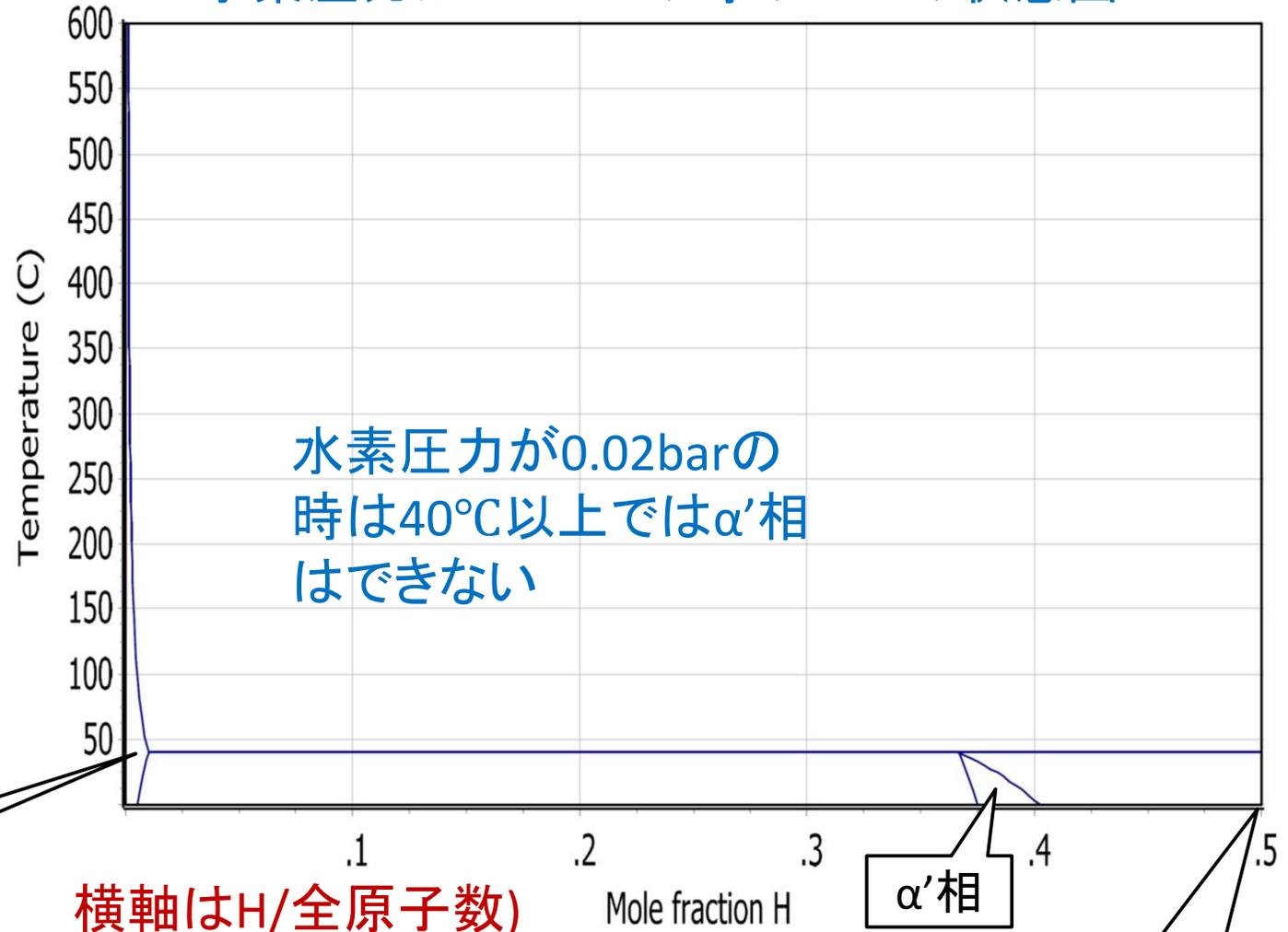
α 相 \leftrightarrow α' 相間の相変態
を起こすと、体積変化
により歪が生じる。

「死後の熱」は α
相で生じる

0.127mol%H Pd-xH P=0.02bar



水素圧力が0.02barの時のPd-Hの状態図



横軸はH/全原子数)

α' 相はリチウムを固溶しない。

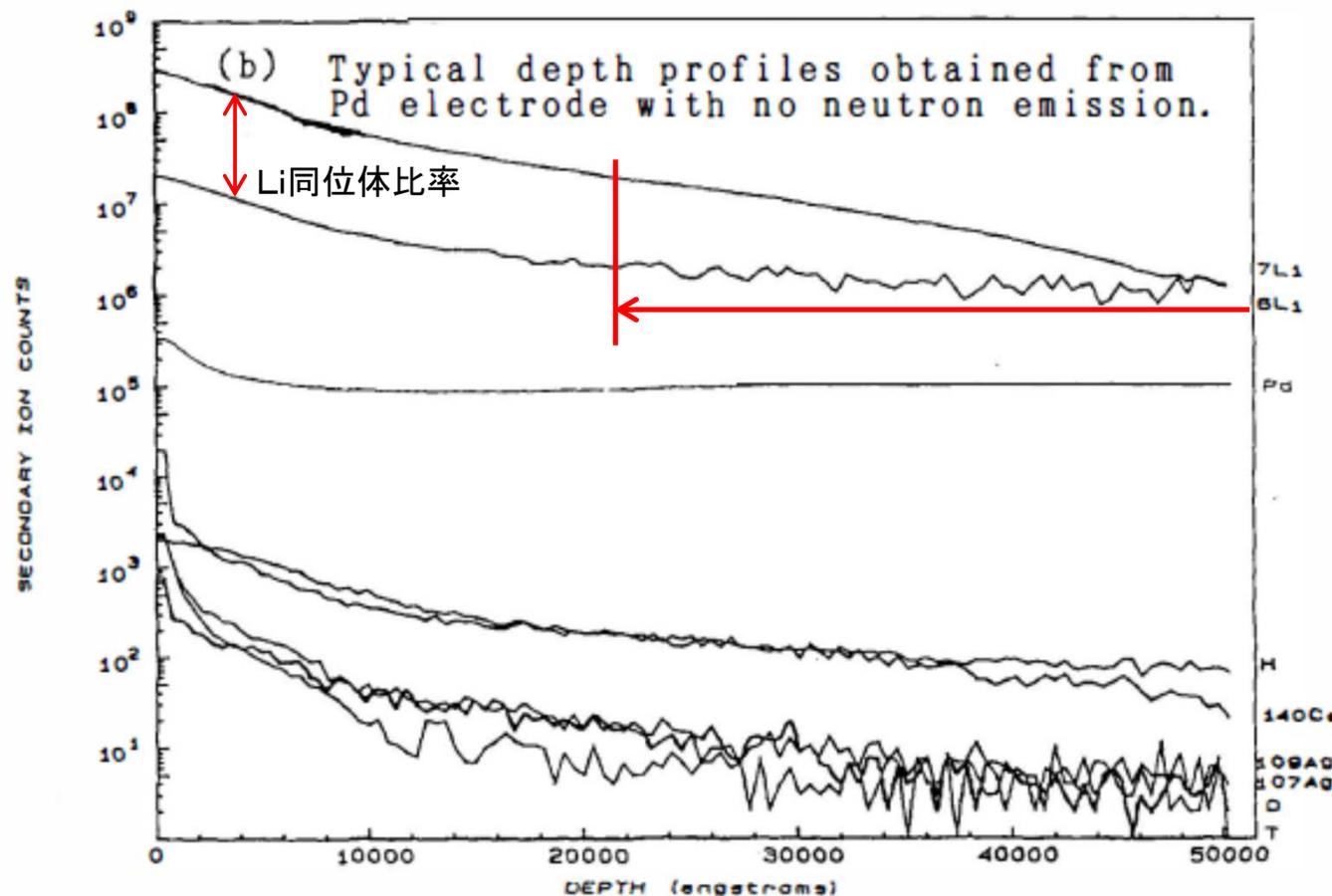
H:Pd=1:1

* (株) 計算熱力学研究所のソフト-Shobu, K. New thermodynamic equilibrium calculation software, CALPHAD, 33 (2009), pp 279-287.

何故長時間の電解が必要なのか？

Liが固溶していることが「死後の熱」の発生要件

「死後の熱」を経験したと考えられるサンプル



Liに対して重水素が異常に少ないことと、Liの拡散が進んでいることから、高温に晒された履歴があると考ええる。

自然界の同位体比率に対して、 ${}^6\text{Li}$ が増加している核反応領域が存在している。

自然界のLiの同位体比率は
 ${}^6\text{Li} : {}^7\text{Li} = 7.5\% : 92.5\%$

Pd-5電極の2次イオン量(拡大図)

ICCF2 p583 Fig.1より

Mutuhiro Nakada, Takehiro Kusunoki, Makoto Okamoto and Osamu Odawara "A Role of Lithium for the Neutron Emission in Heavy Water Electrolysis" Ikegami, H., ed. Third International Conference on Cold Fusion(1992), "Frontiers of Cold Fusion". 1993, Universal Academy Press, Inc., Tokyo,

「死後の熱」発現のための実験条件

これまでの実験



1. PdにDを多く入れ、 α' 相にしてしまう。
2. Liを使用しない。



1. PdはDの少ない α 相に維持する。
2. PdにLi(^6Li)を固溶させる。

金属結晶内は核反応の特殊環境

1. 核反応断面積が広がる
2. D-D-D 3核核反応が生じる

最大限、金属結晶の効果を高める

- 金属結晶のチャネリングを利用
- チャネリング路に格子間原子が来るようにする

3. Pdは歪の少なくするために、焼鈍した純Pdを用いる。

大山パワーの金属結晶閉じ込め型核融合炉の要件

「死後の熱」はPd陰極内の核融合連鎖反応で発生する

- A) $X + {}^2\text{H} \rightarrow X + \text{d}$ 確実に起動するにはイオンを照射するのが望ましい。
:数MeVクラスのイオンがチャネリング現象により格子間原子 ${}^2\text{H}$ の原子核に導かれ、Dイオンビームを生成する。
- B) $\text{d} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^6\text{Li} (1.5\text{MeV})$:連星核形成による「穏やかな核融合」
($\alpha + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li}$)
 $\text{d} + \text{DD連星核} \rightarrow {}^6\text{Li}$
- C) $\text{d} + {}^6\text{Li} \rightarrow 2\alpha (22.4\text{MeV})$:又は3連星核融合で生成される

${}^7\text{Li}$ の存在は連鎖反応の起動に不利には働かないが、中性子を発生したり、連鎖反応を阻害したりするので、再現実験には ${}^6\text{Li}$ を用いることが望ましい。

- D) $\text{d} + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} (7.9\text{MeV}) + {}^5\text{He} (6.3\text{MeV})$
 ${}^5\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{n} (0.9\text{MeV}) : 700 \times 10^{-24} \text{sec}$: α イオンビームと中性子が出る

金属結晶閉じ込め型核融合炉



確実に起動するために α 線源を用いた。



金属結晶閉じ込め型核融合炉の実験炉

${}^6\text{Li}$ をトープした $\phi 76\text{Pd}$ サンプルと α 線源

12. 放射線の放出により実験炉の起動を確認

ベーキング時
D₂ガス供給後

2019年1月24日10時31分 γ 線バックグラウンド0.020~0.050 μ Sv/hに対して0.400 μ Sv/h以上を表示、その後約**1.5h**連続して0.100 μ Sv/h以上を表示した。

2019年1月24日19時38分 γ 線が0.100 μ Sv/hを越え、下がり始めた後、バックグラウンド0.00~0.05 μ Sv/hの**中性子で3.40 μ Sv/h**(確認できた数値)以上の表示があった。補正カウント**3513.5/5分**

ページ	記録日時	線量率	単位	積算線量	単位	線量率	ページ	単位	積算線量	単位	積算モード	バック周期	補正カウント	電池電圧(V)	高圧測定値(V)
34	2019/01/24 18:49:51	0.03	μ Sv/h	0.13	μ Sv	0.003	34	mrem/h	0.013	mrem	ON	300	4.0	7.70	315
34	2019/01/24 18:54:51	0.02	μ Sv/h	0.13	μ Sv	0.002	34	mrem/h	0.013	mrem	ON	300	1.0	7.70	315
35	2019/01/24 18:59:51	0.02	μ Sv/h	0.14	μ Sv	0.002	35	mrem/h	0.014	mrem	ON	300	2.0	7.64	315
35	2019/01/24 19:04:51	0.02	μ Sv/h	0.14	μ Sv	0.002	35	mrem/h	0.014	mrem	ON	300	2.0	7.64	315
35	2019/01/24 19:09:51	0.02	μ Sv/h	0.14	μ Sv	0.002	35	mrem/h	0.014	mrem	ON	300	1.5	7.64	315
35	2019/01/24 19:14:51	0.01	μ Sv/h	0.14	μ Sv	0.001	35	mrem/h	0.014	mrem	ON	300	0.5	7.64	315
35	2019/01/24 19:19:51	0.02	μ Sv/h	0.14	μ Sv	0.002	35	mrem/h	0.014	mrem	ON	300	2.0	7.64	315
36	2019/01/24 19:24:51	0.01	μ Sv/h	0.14	μ Sv	0.001	36	mrem/h	0.014	mrem	ON	300	0.0	7.58	315
36	2019/01/24 19:29:51	0.07	μ Sv/h	0.15	μ Sv	0.007	36	mrem/h	0.015	mrem	ON	300	6.5	7.58	315
36	2019/01/24 19:34:51	0.03	μ Sv/h	0.15	μ Sv	0.003	36	mrem/h	0.015	mrem	ON	300	1.5	7.58	315
36	2019/01/24 19:39:51	0.11	μ Sv/h	4.52	μ Sv	0.011	36	mrem/h	0.452	mrem	ON	300	3513.5	7.58	315
36	2019/01/24 19:44:51	0.05	μ Sv/h	4.52	μ Sv	0.005	36	mrem/h	0.452	mrem	ON	300	4.5	7.58	315
37	2019/01/24 19:49:51	0.02	μ Sv/h	4.52	μ Sv	0.002	37	mrem/h	0.452	mrem	ON	300	1.0	7.44	315
37	2019/01/24 19:54:51	0.02	μ Sv/h	4.53	μ Sv	0.002	37	mrem/h	0.453	mrem	ON	300	1.5	7.44	315

図16 中性子バースト時の記録

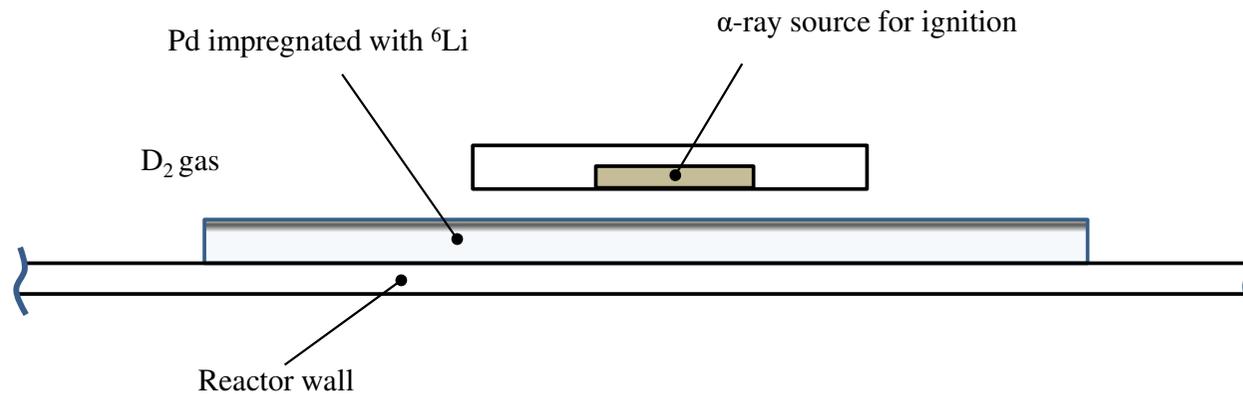
発熱は未確認

その後も小さい γ 線バーストと中性子バーストを多数確認している。

1月26日9時3分 中性子で**16 μ Sv/h**を表示を確認した。補正カウント**100.5/5分**

1月27日17時35分 中性子で**3.02 μ Sv/h**を表示を確認した。補正カウント**37.5/5分**

実験原子炉の構造 JCF20参照



金属結晶閉じ込め核融合炉

焼鈍したPd板の上面にピーク濃度を0.059mol%の3倍の0.177mol%になるように5.1E15個/cm²の180keVの⁶Liイオンをドーピングしたサンプルと、その上部に自然界からの高エネルギー放射線に代わるものとして8000Bqの²⁴¹Amのα線源(1秒間に8000個のα線を出す)を置き、炉内部に重水素ガスを導入する。

実験後、Pdの焼鈍処理のとき2%の水素(H₂)ガスを含む窒素(N₂)ガス雰囲気で行われていたことが判明した。

実験原子炉で起きた現象

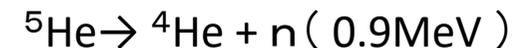
1. 重水素供給前のベーキング時に、75°Cに昇温後25時間経過時に、0.3Paのときに原子炉中心から40cmの距離のγ線サーベイメーターの表示が0.8μSv/hを超え、平常時の4～5倍の0.300μSv/h以上のγ線放出が1.5h 連続した。これは以下の反応により



放出されたe⁺が対消滅した時のγ線が観測されたものと考えている。

軽水素が反応し始めてしまったが核融合連鎖反応の起動条件を満たしていたと考える。

2. その後、53.7gのPdサンプルに対して0.00446 mol%に当たる0.258ccの重水素を供給したとき、γ線放出があり、続いて1秒程度の中性子爆発が発生した。このときの圧力は20Paであった。5分間の中性子の総被爆量は4.37μSvで、バックグラウンドの2000倍の被爆量であった。この後も何回かγ線放出後中性子バーストを起こしている。重水素供給にミスがあり、実験をリセットするためのベーキング開始後2～3分後に、瞬間的に16μSv/hに達したやや小さい中性子バーストを起こしている。



当該中性子爆発は、⁷Liが存在するために発生した。狙った核融合連鎖反応のdイオンが生成されていた証拠。本来の核融合連鎖反応が成立した。

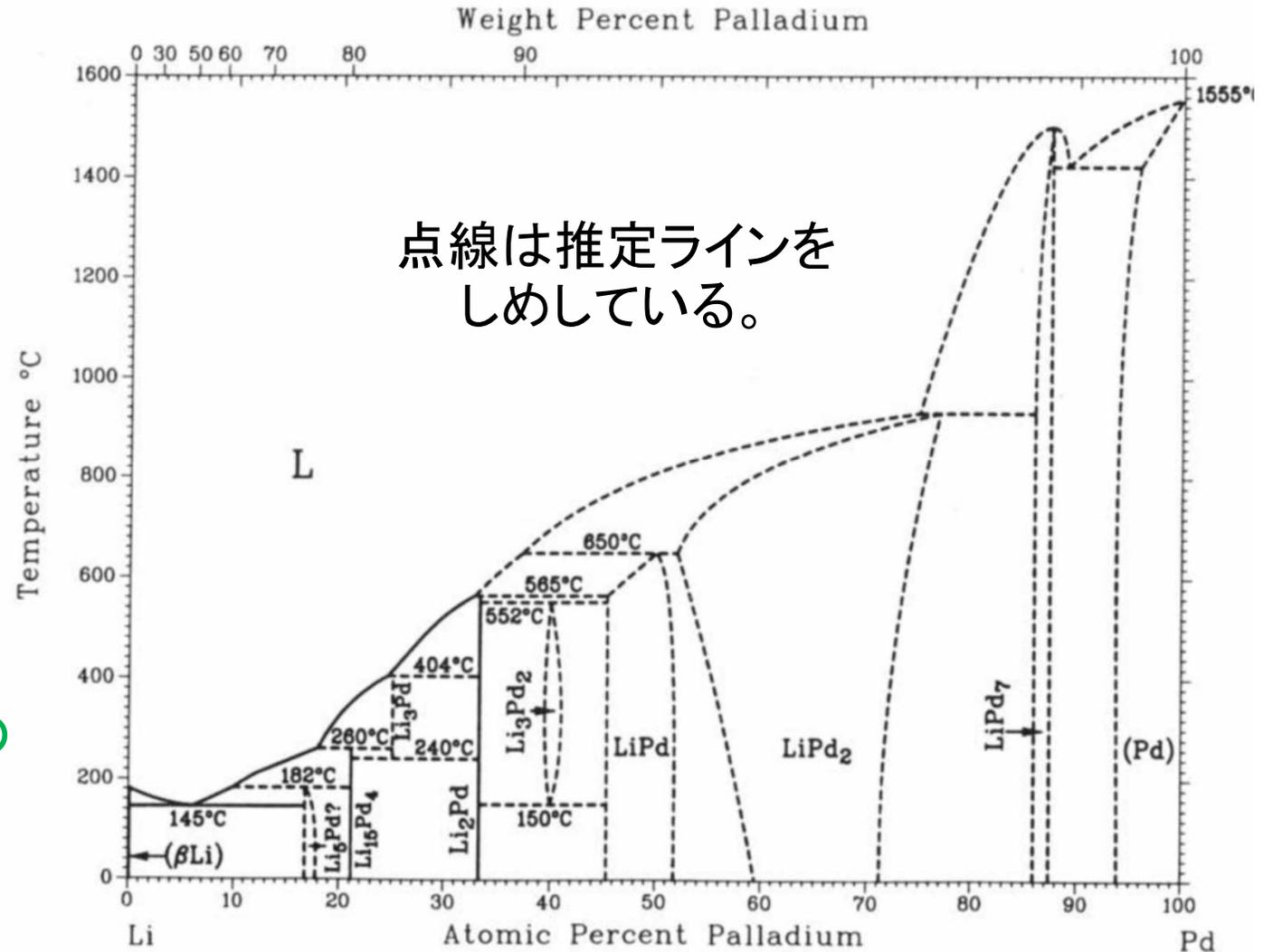
3. 更に当初実験で予定したPdサンプルに対して0.059mol%に当たる3.415ccの重水素を供給した後、再度ベーキングを行った際にも0.503Paの時に、一時1.200μSv/hを超えるγ線放出があり、γ線サーベイメーターの警報が鳴った。その後、30分以上続くγ線放出があり、その間に小さな中性子爆発が起きた。その後もベーキングの最中に更に小さな中性子爆発を複数回確認している。

Pd-H推定状態図がまだ確定できていない。

Pdを加熱して1mol%程度のLiを固溶して、常温に戻してもLiPd₇が析出することはないはずであった。

Pd代替え金属探索の
為には、当該状態図の
確度向上が必用である。

Li-Pd Phase Diagram



周知のLi-Pd推定状態図

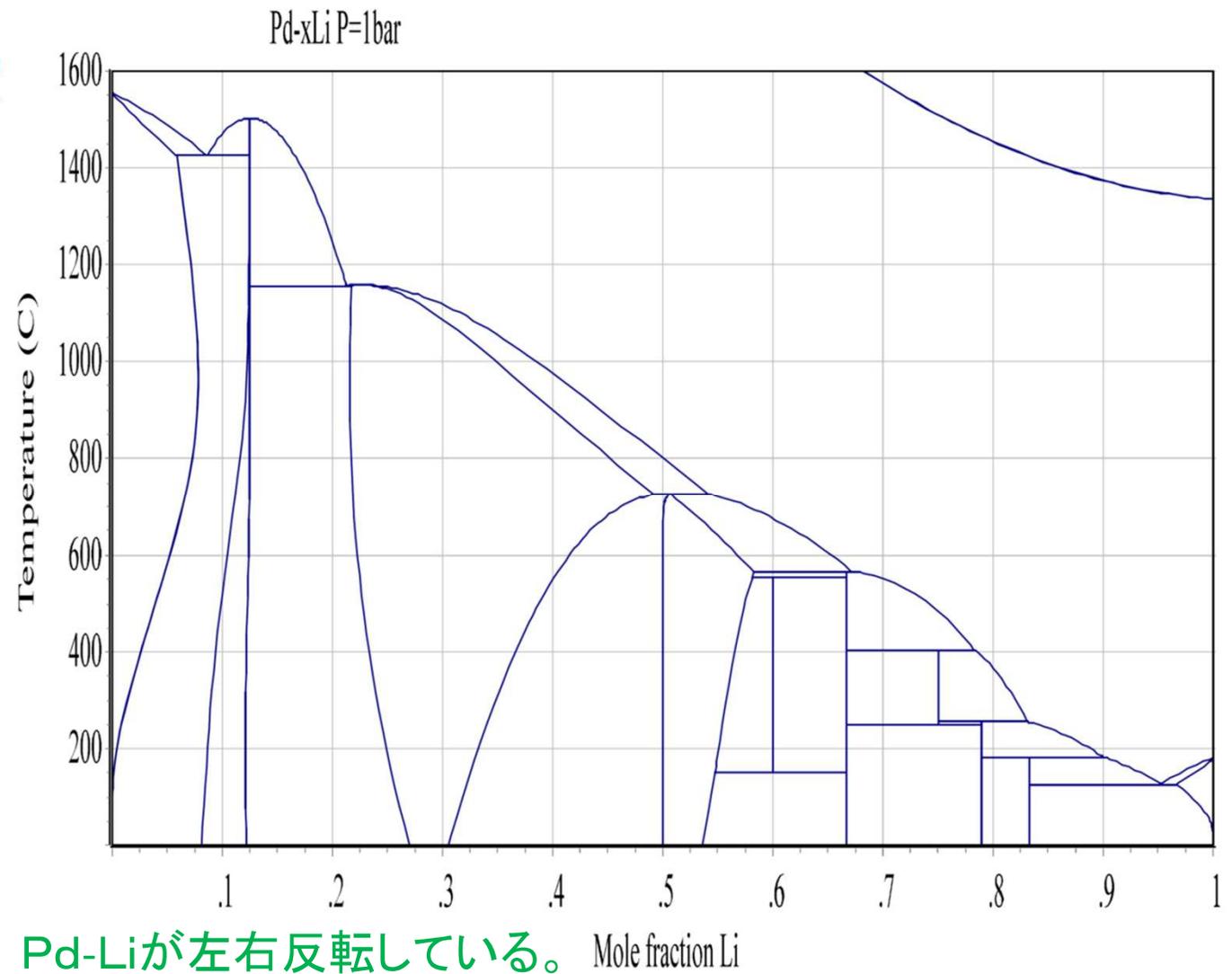
Sangster, J. Peiton, A. D. Binary Alloy Phase Diagrams, Second Edition, Ed. by Massalski, T. B. ASM International, (1991), 2456.

Pd-H推定状態図2

実際には、100°C程度ではPd- α 相にLiは0.019mol%程度しか固溶しないらしい。

高温でLiを固溶させると、温度を下げたときにLiPd₇が析出してしまふ。

Pd-Li状態図の精度向上が必用



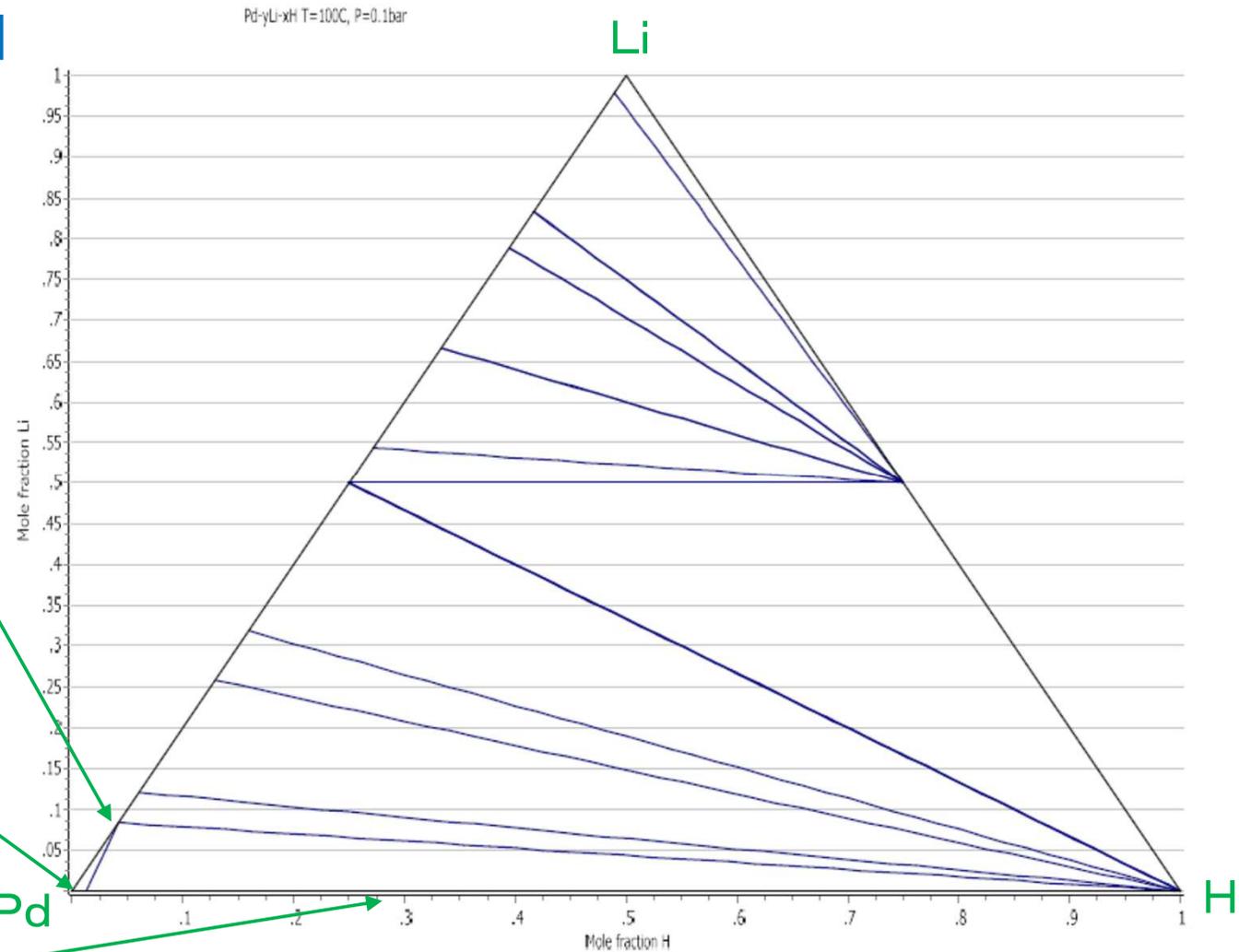
今回CaTCalc*で計算したPd-Li推定状態図

* (株) 計算熱力学研究所のソフト-Shobu, K. New thermodynamic equilibrium calculation software, CALPHAD, 33 (2009), pp 279-287.

Pd-Li-H 3元推定状態図

100°C, 0.1barの状態図

同様にPd-Li-H 3元状態図の精度向上が必須である。



α相は直線に見えている。

圧力が低いのでα'相は存在しない。

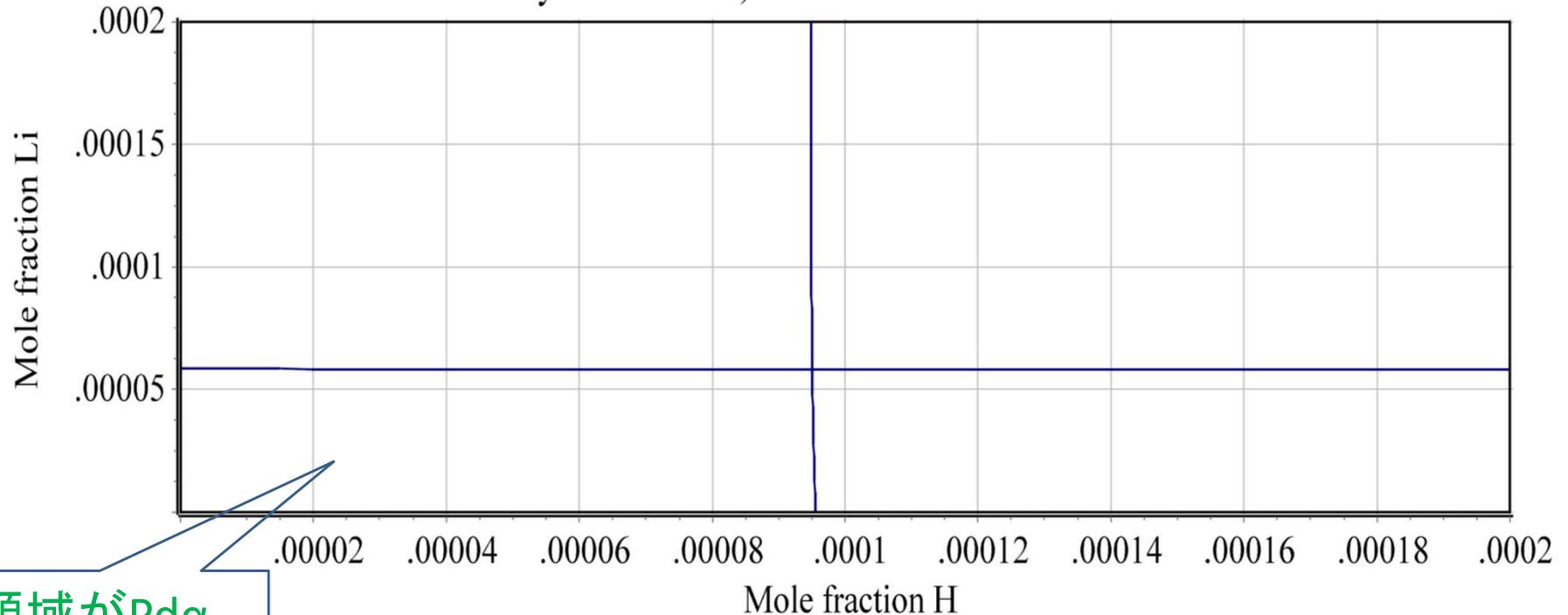
今回CaTCalc*で計算したPd-Li-H推定状態図

* (株)計算熱力学研究所のソフト-Shobu, K. New thermodynamic equilibrium calculation software, CALPHAD, 33 (2009), pp 279-287.

Pd-Li-H 3元推定状態図(部分拡大)

75°C, 10^{-6} barの推定状態図

Pd-yLi-xH T=75C, P=5E-6bar



この領域がPd α 相で、右上隅のmol fraction Hは 9.50×10^{-5} でmol fraction Liは 5.79×10^{-5} である(推定)。

CaTCalc*で計算したPd-H-Liの推定3元状態図(部分)

* (株)計算熱力学研究所のソフト-Shobu, K. New thermodynamic equilibrium calculation software, CALPHAD, 33 (2009), pp 279-287.

10^{-6} barという圧力はベーキングの最中でも起動する可能性を提示している。原子炉の炉体の密封性も課題になる圧力である。

75°C, 10^{-6} barで起動するかは不明だし、 $H > Li$ が起動条件かも不明である。

閉じ込め型核融合炉用の発熱体

1. チャネリング高価を高めるため、不純物を減らし、金属を焼鈍し歪を減らし、かつ結晶粒を巨大化すること。
2. 含有水素も不純物なので微量にする。
3. それぞれの金属種に適正な水素を含有する温度と圧力がある。
4. 「死後の熱」の発生は固溶元素としてLiが必須である。
⇒Liが固溶する元素である必要があるが、固溶させ方も課題である。

発熱体金属の選定

1. Pdでは高価すぎる。また100°C前後の反応温度は発電用には低すぎる。
2. チャネリングにより格子間原子に高エネルギーイオンを導けるのはhcpかbcc構造の金属である(hcpは不適切)。
3. Ta, NbはLiを固溶しないので不適切。

発熱体金属の選定の進め方

1. Pdで連鎖反応条件の探索。反応の安定化するH, Li濃度の特定。
そのためのPd-Li-Hの3元状態図の精度向上。
2. 反応に必要な不純物限度。
3. 金属種の選定と適正な水素を含有する温度と圧力を決める。

研究課題

核融合連鎖反応理論の確立

原子核物理の世界に残された解明されていない以下の現象を説明できれば、理解を得られる。

1. 金属内の遮蔽エネルギーの理論値との乖離
2. 金属内でのDDD3核核融合による粒子の生成
3. 低質量原子核に対する中性子の反応断面積
4. DT核融合断面積

上記を説明するには湯川中間子理論の核力の仮説式の修正が必用である。

『金属結晶閉じ込め型核融合炉』の産業利用

より安価なPd代替え金属を見出す必要がある。

1. 正しいPd-Li状態図の作成
 2. 正しいPd-Li-Dの3元状態図の作成
- まだやるべき多くの課題が残されている。

以上