金属の水素溶解熱*

柳 沢 三 郎** 辻 岡 昭***

Saburo Yanagisawa and Akira Tsujioka: The Heat of Solution of Hydrogen in Metals. Metals which absorb hydrogen can be classified into three groups: (a) group of salt-type-hydride forming metals, where hydrogen atoms are located substitutionally in the lattice, thus absorbing exothermically large quantity of hydrogen: NaH, CaH₂..., (b) group of true solution of hydrogen in metals, so-called "poor absorbers", where hydrogen atoms are located interstitially in the lattice, thus absorbing endothermically only a small quantity of hydrogen: H in Fe, Ni, Cu..., (c) intermediate group of the above both groups, so-called "good absorbers" mixtures of hydride and interstitial solutions, absorbing apparently exothermically mediate quantity of hydrogen: Pd, Ti, U... The authors have found that the heat of solution of hydrogen of a- or b-group metals is proportional or in inverse ratio respectively to the ionization energy of the metals. These facts, together with other phenomena, may be cited as proofs of the negative or positive character of the dissolved hydrogen atom in the metals.

(Received October 11, 1958)

I. 緒 言

水素を吸収する金属には明らかに水素化物を作つて多量の水素を発熱的に吸収するものと、これと反対に水素化物を作らず格子侵入型の位置に極めて少量の水素を吸熱的に吸収するいわゆる poor absorber が存在する⁽¹⁾⁽²⁾。前者の代表的なものとしてはアルカリ・アルカリ土金属があり、後者は Fe・Ni・Cu・Pt など、また両者の中間的存在として水素化物を発熱的に作り一部格子侵入型溶解も含まれ、水素吸収量も両者の中間にあつて両者の混合の溶解機構をもつと考えられる Pd・Ti・Zr・V・Th 等のいわゆる good absorber が存在する。著者らはこの両極端の2群が生成される機構を考察した。

II. 水素化物を作る金属の水素溶解熱††

(1) アルカリ金属の水素化物の生成熱と他の熱化学的量の関係

アルカリ水素化物はハロゲンアルカリと同じようなイオン結晶であるから⁽³⁾、Born-Haber の熱化学的輪行⁽⁴⁾を適用すると次式が成立つ。

$$-\Delta H = U_0 - S - V_i - \frac{1}{2} \chi + E \quad \cdots \cdots (1)$$

ただし、 $-\Delta H$: 水素化物の生成熱, U_0 : 結晶エネルギー,

S : 金属の昇華熱, V_i : 金属のイオン化エネルギー, χ : 水素分子の解離熱(102 kcal/mol), E : 水素の電子親和力(16.4 kcal/mol)。

この式において χ と E は金属と無関係の定数であるから生成熱と金属のイオン化エネルギーとの関係を知るためには結晶エネルギーおよび昇華熱とイオン化エネルギーとの関係を考察する必要がある。

(2) アルカリ水素化物の結晶エネルギーとアルカリ金属のイオン化エネルギー

イオン化合物の結晶エネルギー U_0 は Born⁽⁵⁾ によれば次式で表わされる。

$$U_0 = (NAe^2Z^2/R_0)(1-1/n) \quad \cdots \cdots (2)$$

ただし、 N : Avogadro 数, A : Madelung 恒数(食塩型構造では $A=1.747558$), e : 電子の荷電, Z : イオンの原子価, R_0 : 陰陽両イオンの最小距離, n : Born の巾数。

式(2)を用いて U_0 の値を計算すると Table 1 となる。

Table 1 Crystal energy of the alkali hydrides calculated by the Born's equation.

	R_0 6) (Å)	n	U_0 (kcal/mol)
LiH	2.68	5	172
NaH	3.03	6	160
KH	3.41	7	145

式(2)により得られる U_0 の値は近似値で、より正確な値を求めるには van der Waals 力を考慮し指数形の反撥函数を使わなければならない⁽⁶⁾、同族元素の水素化物に対しては U_0 の値はおおよそ $(1-1/n)/R_0$ なる量に比例する値であることが判る。ところが Li, Na, K の順にイオン半径は大きく R_0 は大になるがイオン化エネルギー V_i は逆に小になる。従つて R_0 と逆比例の関係にある U_0 の値は V_i と近似的に比例すると考えられる。この考えの大過ないことは Fig. 1 から明らかである。一方式(1)により U_0

(5) M. Born: Z. Phys., 7(1921), 124.

(6) L. Pauling: 文献(3), 346.

(7) M. Born, J. E. Mayer: Z. Phys., 75(1932), 1.

** 慶応大学工学部応用化学教室

*** 慶応大学医学部

* 1950 年 4 月本会東京大会に発表

(1) Borelius: Ann. Phys., 83(1927), 121.

(2) H. J. Emeléus & J. S. Anderson: *Modern Aspects of Inorganic Chemistry*, (1938), 13-14.

† Pd は good absorber であるが poor absorber との中間に位する。

(3) L. Pauling: *The Nature of the Chemical Bond*, 50 Emeléus & Anderson: 文献(2), 257; Lewis: J. Amer. Chem. Soc., 38(1916), 774; Moers: Z. anorg. Chem., 113(1920), 179; Peters: ibid, 131(1923), 140.

(4) M. Born: Verhandl. deut. phys. Ges., 21(1919), 13; F. Haber: ibid., 21(1919), 750.

†† この場合金属と水素との反応の熱含量の変化として水素化物の生成熱をとり水素溶解熱とした。

の値を他の熱化学的量の既知の測定値を用い計算すると Table 2 となる。

Fig.1 Crystal energy of the alkali hydrides and the ionization energy of the alkali metals

Table 2 Crystal energy U_0 of the alkali hydrides obtained by the Born-Haber cycle.

	$S^{(8)}$ (kcal/mol)	$V_i^{(9)}$ (kcal/mol)	$-\Delta H^{(10)}$ (kcal/mol)	U_0 (kcal/mol)
Li	38.3	123.7(123.8 ⁽⁸⁾)	21.6	218.3(218 ⁽¹¹⁾ 219 ⁽¹²⁾)
Na	26.0	117.3(118.0)	16.6	195.2
K	21.7	99.5(99.6)	10.0	165.9

ただし単位はすべて原子単位で ρ は全エネルギーが極小になる時の原子球の半径。

ところで同族元素間では原子半径 ρ とイオン化エネルギー V_i とは近似的に反比例すると考えられる (Table 3)。

Table 3 The radius of the atomic sphere the and ionization energy of alkali metals.

	ρ [Å]	V_i [kcal/mol]	ρV_i
Li	2.0 ⁽¹⁴⁾ (1.99 ⁽¹⁸⁾)	123.7	247
Na	2.15 (2.13)	117.3	252
K	2.65 (2.60)	99.5	258

従つて式(4)において $1/\rho$ の代りに V_i を入れ、かつ第2項は小さな値であり、この項の金属による差を無視しても S の値に大きく影響しないから*、これを一定と見做し式(4)を書き換えると次の近似式を得る。

$$S = ksVi + ks' \quad (ks, ks' \text{ は定数}) \dots \dots \dots (5)$$

Table 4 に示した既知の昇華熱の値を用いて式(5)を検討してみると Fig. 2 に見られる如くで、Fröhlich の理論値とは特によい一致を示す。

(8) J. Sherman: Chem. Rev., 11(1932), 93.

(9) 化学便覧, 633; ()内は L. Pauling: 文献 3), 341.

(10) Eméleus & Anderson: 文献 2), 260.

(11) L. Pauling: 文献 3), 343.

(12) E. A. Hylleraas: Z. Phys., 63(1930), 771.

(13) H. Fröhlich: Proc. Roy. Soc., 158(1937), 97.

(14) 金属便覧, (金属学会), (1952), 210.

Table 4 The heat of sublimation of alkali metals (kcal/mol).

	Theoretical value ⁽¹³⁾	Experimental value
Li	24.5	38.3 ⁽¹⁵⁾ 39.0 ⁽¹⁶⁾ 46 ⁽¹⁷⁾
Na	22	26.0 26.0 30
K	17	21.7 22.6 26.5

Fig.2 The heat of sublimation of alkali metals and its ionization energy.

(4) アルカリ水素化物の生成熱とイオン化エネルギー

先に得られた結果を総合してアルカリ水素化物の生成熱、 $-\Delta H$ 、とイオン化エネルギーとの関係を求める。すなわち式(1)に式(3)、(5)を代入すると次式になる。

$$-\Delta H = k_H Vi + k_H' \dots \dots \dots (6)$$

ここに k_H, k_H' は定数で、 $k_H = k_U - k_S - 1$, $k_H' = -k_S' - \frac{1}{2} \chi_a + E$ 。

かくてアルカリ水素化物の生成熱はその金属のイオン化エネルギーの1次関数として示されることが、半理論的な近似で導かれたが、一方直接 $-\Delta H$ の測定値を用いその V_i との関係を求めてみると Fig. 3 に示されるに同一

Fig.3 The heat of formation of alkali hydrides and the ionization energy.

の結論に達する。なお $-\Delta H$ の測定値は Table 5 に示すように極めて多いが、著者らは Smithells⁽¹⁸⁾ の値を採用した。また Fig. 3 の直線より求めた定数 k_H と k_H' の値は

* 式(4)の単位は Rydberg および Bohr 単位であるのでこれを kcal/mol および Å 単位に換えると $S = 329.4/\rho - 63.6/\rho^2 - Vi$ となる。次に Table 3 より $\rho Vi \approx 252$ とおくと $S = 1.31Vi - 0.001Vi^2 - Vi$, またアルカリ金属の V_i の平均値は凡そ 112 kcal/mol であるから、 $Vi = 112 + \Delta Vi$ とおくと $S \approx 0.31Vi - 12.5 + 0.22\Delta Vi$ すなわち式(5)はこの式の第3項を無視したことになり、この仮定による誤差は凡そ ± 2.6 kcal/mol である。なお Fröhlich の理論値 (Fig. 2 の曲線 I) より求めた式(5)は $S = 0.31Vi - 13.2$ である。

(15) J. Sherman: Chem. Rev., 11(1932), 93.

(16) 原島, 鮮: 固体の凝集機構, 166.

(17) Grim, Wolf: Hanab. d. Phys., 24/2(1934), 1073; Rabinowitsch, Thilo: Z. Phys. Chem., B, 6 (1930), 298.

それぞれ 0.38 および -27 で、これらは Fig.1 と Fig.2 とから得られる ku , ks , および ks' の値* を用いて計算

Table 5 The heat of formation (ΔH) of alkali hydrides, [kcal/mol].

	$-\Delta H$	Other values
LiH	21.60 ⁽¹⁰⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾	21.61 ⁽²⁰⁾ , 21.34 ⁽²⁷⁾ , 21.3 ⁽²⁸⁾
NaH	16.6 ⁽¹⁰⁾⁽¹⁸⁾⁽²²⁾	13.14 ⁽¹⁸⁾ , 12.8 ⁽²³⁾⁽²⁸⁾ , 13.7 ⁽²⁶⁾ , 13.9 ⁽²⁴⁾ , 14.44 ⁽²⁵⁾ , 13.60 ⁽²⁷⁾
KH	10.0 ⁽¹⁸⁾	9 ⁽²¹⁾ , 13.6 ⁽²⁶⁾ , 14.24 ⁽²⁴⁾ , 14.15 ⁽²⁵⁾ , 15.16 ⁽²⁷⁾ , 12 ⁽²⁸⁾

した k_H, k_H' の値 ($k_H=0.41$, $k_H'=-26.6$) と極めてよい一致を示す(単位 kcal/mol).

(5) アルカリ土金属水素化物の生成熱とイオン化エネルギー

アルカリ金属の場合と同じ方法で、水素化物の生成熱と平均イオン化エネルギー V_{im} との関係を考察する。アルカリ土金属の水素化物について Born-Harber の熱化学的論行を適用すると次式を得る。

$$-\Delta H = U_o - S - 2V_{im} - \chi + 2E \dots\dots\dots(7)$$

ここに各文字は式(1)と同じである。既知の測定値を用いてこの式から U_o の値を計算すると Table 6 のようになる。

Table 6 Crystal energy U_o of the alkali earth hydrides obtained by the Born-Haber cycle*.

	S (kcal/mol)	V_{im} (kcal/mol)	$-\Delta H$ (kcal/mol)	U_o (kcal/mol)
Ca	39 ⁽²⁹⁾⁽⁴⁸⁾⁽³⁰⁾	208.7 ⁽³¹⁾⁽²⁰⁷⁾⁽³²⁾	46.60 ⁽³³⁾ (46.0 ⁽³⁴⁾ , 51.1 ⁽³⁵⁾)	572.3(581.3)
Sr	39	190.5 (202)	42.20 (---, 42.2)	531.5
Ba	39	174.8 (175)	40.96 (40.8, ---)	498.7

ここに得られた U_o の値を V_{im} に対して図示すると

* $U_o=1.72V_i$, $S=0.31V_i-8.1$: いずれも直線Ⅱを用いて求めた。

(18) C.J.Smithells: *Metals Reference Book*, London (1949), 384.

(19) K.Moers: *Z.anorg. allg. Chem.*, **71**(1911), 403.

(20) A.Guntz: *Compt. rend.*, **123**(1896), 694.

(21) I.Kasarnowsky, M.Proskurnin: *Z.Physik*, **43**(1927), 512.

(22) M.de Forcrand: *Compt. rend.*, **140**(1905), 990.

(23) H.Hagen, A.Sieverts: *Z. anorg. allg. Chem.*, **185**(1929), 254.

(24) F.G.Keys: *J.Amer. Chem Soc.*, **34**(1912), 779.

(25) E.F.Sollers, J.L. Crenshaw: *J.Amer. Chem. Soc.*, **59**(1937), 2015, 2724.

(26) F.D.Rossini, et al: *Selected Values of Chem. Thermodynamical Properties*, (1952).

(27) C.E.Messer, L.G.Fasolino, C.E.Thalmayer: *J.Amer. Chem. Soc.*, **77**(1955), 4524.

(28) 化学便覧(日本化学会, (1952)), 557.

(29) Grim & Wolf: *Hanab. d. Phys.*, **24/2**(1934), 1073.

(30) 原島, 鮮: 文献 (16) p.3.

(31) 化学便覧(日本化学会, (1952)), 633.

(32) H.J.Eméleus & J.S.Anderson: 文献 (2). 13.

(33) *ibid.*, 260.

(34) C. J. Smithells: *Metals Reference Book*, London, 384.

(35) 化学便覧, 561.

Fig.4 の如く、アルカリ金属の場合と同様に比例の関係にある。次に昇華熱についてはその測定値が極めて少なく、

Fig.4 The crystal energy of alkali earth hydrides and the mean ionization energy of alkali earth metals.

Fig.5 The heat of formation of alkali earth hydride and the mean ionization energy.

しかも区々であるため S と V_{im} の関係は求め難いので、直接生成熱の既知の測定値と V_{im} の関係を図示すると Fig.5 を得る。かくてアルカリ土類金属の場合もその水素化物の生成熱は、その金属の平均イオン化エネルギーの 1 次函数として表わされる。

III. Poor Absorber の水素溶解熱

(1) Poor Absorber の水素溶解

この場合の溶解度 S の温度変化は Borelius⁽¹⁾によれば

$$S = C \cdot \exp(-E_s/RT) \dots\dots\dots(8)$$

ここに C : const., E_s : 溶解熱 kcal/g-atom of H, かつ $E_s > 0$ すなわち温度と共に溶解量が増し見掛け吸熱反応を示す。この現象については竹内, 斎藤⁽³⁶⁾および Fowler, Smithells⁽³⁷⁾ は次のように解析した。poor absorber に水素が溶解する時は水素が金属表面に吸着解離し、生じた水素原子が proton と電子に解離し、この H^+ が金属格子中に interstitial に吸収され、電子は金属自由電子に加わる。式(8)に示される水素溶解熱 E はいわば見掛けの溶解熱であつて、これは H_2 の解離熱と金属の H 溶解熱 χ (真の溶解熱ともいうべき金属-proton 間ポテンシャル)との和として与えられる。すなわち斎藤, Fowler によれば式(8)は次の如く書ける。

- (36) 斎藤, 川合, 栗野: *Res. Inst. Min. dress. Met.*, Tohoku Univ., **5**(2)(1949), 33; 斎藤: *ibid.*, **6**(2)(1950), 125; 竹内, 斎藤, 金属便覧, (1952), 69; 松田: 本誌, **13**(1949), 10.
(37) R.H.Fowler, C. J. Smithells: *Proc. Roy. Soc.*, A **160**(1937), 338.

$$S = C \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{1}{2} \chi_a + \chi_s \right) / RT \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここに χ_a : H_2 の解離熱 ところが H_2 の解離は大なる吸熱反応であるため、実際の金属-H⁺ 間の反応が小なる発熱反応であるのに金属の水素溶解反応は見掛け上吸熱反応になるものであることを示した。すなわち $-\frac{1}{2}\chi_a > E_s > 0$

$$\therefore \chi_s = -\frac{1}{2}\chi_a + E_s < 0$$

(2) 金属-H⁺ 間反応熱 ($-\chi_s$) と金属のイオン化エネルギー

poor absorber の水素溶解の本質を検討するには溶解熱 E_s よりも χ_s を考える方がより妥当で、金属による差異は χ_s に表われるはずであるから、熱含量変化として $-\chi_s$ をとる*。

いま Smithells⁽³⁸⁾ が Sirverts⁽³⁹⁾ らの測定結果から Borelius の式により求めた溶解熱 E_s の data を用いて計算した χ_s の値を Table 7 に示す。

Table 7 The values of apparent heat of solution, true heat of solution of hydrogen in metals and ionisation energy of metals.

	E_s (kcal/g-atom of H)	$-\chi_s$ (kcal/g-atom of H)	V_i (eV)
Al	22.75 ⁽³⁸⁾	28.25	5.94 ⁽⁴¹⁾ (5.96 ⁽⁴⁰⁾)
Ag	5.80	45.20	7.58 (7.54)
Cu	14.30	36.70	7.67 (7.68)
Ni	2.70	48.30	7.6 (7.61)
Co	8.50	42.50	7.8 (7.8)
Fe	7.80	43.20	7.83 (7.83)
Mo	1.75	49.25	7.2 (7.35)
Pt	17.70	33.30	8.8 (8.88)

ここに得られた $-\chi_s$ の値と各金属のイオン化電圧との関係を図示すれば Fig.6 の如き双曲線を示す。すなわち

Fig.6 The relation $-\chi_s$ and V_i .

poor absorber 金属の水素溶解においては測定による見掛けの溶解熱 E_s には金属中の水素溶解熱の他に H_2 分子の解離熱が加わっており、これを差し引いた真の水素溶解熱と

なる $-\chi_s$ の値が金属の1価のイオン化電圧**に反比例するという結果が導かれた。なお Fig.6 の Al の値の甚だしいずれは Al の水素平衡溶解度測定において表面の酸化被膜および内部酸化物により著しく、水素拡散を妨げられ正しい測定がなされていないためと、一部水素化物を作り溶解が異常であるためであろう。

IV. 結果の検討

以上アルカリ・アルカリ土金属と poor absorber を比較すると、イオン化エネルギーが前者においてはその水素化物の生成熱に比例し、後者においてはその水素溶解熱 $-\chi_s$ に反比例するという全く対称的な関係が得られた⁽⁴²⁾。アルカリおよびアルカリ土金属の水素化物では水素は H^- になつてゐるが poor absorber 中の溶解水素原子についてもこれがさらに proton と電子への解離 ($H \rightarrow H^+ + e$) が報告されている。すなわち Coehn ら⁽⁴³⁾ は電解によつて水素を吸収せしめた Pd の抵抗測定において $H/Pd \approx 0.8$ 以上の水素濃度から “co-conduction” の急増を認め、Knorr, Schwarz⁽⁴⁴⁾ は電解水素を吸収せしめた Pd 極は、電解電流を切ると同時に抵抗測定に切替えると水素放出と共に抵抗が増してゆくことを確認し、また著者も N について同様な実験により Ni の抵抗が時間と共に定値に達すること、およびその定値に達する時間が Ni 線の太いほど (すなわち水素の逸出が遅いほど) 遅くなることを測定した。岡本, 飯島⁽⁴⁵⁾ は電解電流切断直後の陽極電流をオシログラフによつて追跡し、これを Ni 極からの H^+ の滲出しによる電流とした。堀内, 広田⁽⁴⁶⁾ は Pd 線を封入したガラス容器中に水素を入れ、容器内 Pd 線が水素ガスを吸収した状態で直流を通じてからこの電流を切ると、こんどは逆方向に電流が一時的に流れるのを認めた。すなわち Pd 線中の H^+ は通じた電流により Pd 線の両端に生ずる電位差を償う如く分布し(負側に H^+ 濃度が大きくなり)、これが電流を切ると分布した H^+ の濃度差による電流を生じ、 H^+ が動いて Pd 線中に均一になると電流は止むものである。Moor⁽⁴⁷⁾ は水素電解吸収 Pd 線の D.C. ならびに A.C. 50~15000 $\sim$ における抵抗および静電容量の測定において、電解時間(従つて吸収水素量増加)と共に H^+ による Pd の電導度の増加が測定され、また著者も Ni について同様な測定の結果あつたながら電導度の増加を認めた。Isenberg⁽⁴⁸⁾ は場の理論から金属中の水素は proton の状態であることを導き、また Himmler⁽⁴⁹⁾ も Cu-Zn,

** poor absorber においては金属原子数に対し溶解水素原子数が 10000:1 程度で極めて少いから、1 箇の金属原子に対し 2 箇の水素原子を結合する場合を考える必要がなく、金属の1価のイオン化電圧 ($M \rightarrow M^+$) のみで考えた。

- * アルカリ金属の場合の ΔH は金属と H_2 との反応の熱含量変化であるから、アルカリ金属の場合、この $-\chi$ に相当する値は $-\chi = -\Delta H + 21/\chi$ である。従つて $-\Delta H$ について得られた結論は $-\chi$ にも成立し、 $-\chi$ も V_i の1次関数で表わされる。
- (38) C.J.Smithells. *Gases and Metals*, London, (1938), 151, 152.
- (39) A.Sieverts: *Z. phys. Chem.*, **60**(1907)169; *Ber.* **42**(1909), 338; *Z. phys. Chem.*, **68**(1909), 115; **74**(1910), 277; **77**(1911), 591; **A169**(1934)237. **A 183**(1938)19; *Z. Elektrochem.*, **16**(1910), 707; *Ber.* **43**(1910), 893; **45**(1912), 221.
- (40) Landolt の Table. (41) 化学便覧

- (42) $-\Delta H$ と $-\chi$ とを類似させて考えることについては III の b の脚註参照。
- (43) A.Coehn, W.Specht: *Z. Physik*, **62**(1930), 1; A.Coehn, H.Jürgens: *ibid*, **71**(1931), 179.
- (44) C.A.Knorr, E. Schwarz: *Z. Elektrochem.*, **39**(1933), 281.
- (45) 岡本, 飯島: 理研彙報, **16**(1937), 1426.
- (46) 堀内, 広田: *Proc. Imp. Acad. Tokyo*, **15**(1939), 10.
- (47) G.A.Moor: *Trans. Electrochem. Soc.*, **75**(1939), 237.
- (48) I. Isenberg: *Phys. Rev.*, **79**(1950), 736.
- (49) W.Himmler: *Z. Phys. Chem.*, **195**(1950), 244.

Cu-Ni 合金中の水素溶解の化学ポテンシャルから水素は金属と同様正のイオンすなわち proton として合金成分と同様に溶解することを結論している。著者も⁽⁵⁰⁾Ni 中に水素ガスを溶解せしめた際 400° 以下の温度において導磁率が若干減少することを認め, Svensson⁽⁵¹⁾, Sieverts⁽⁵²⁾ か Pd の 4d の電子穴数 0.6/atom で $H \cdot Pd = 0.6:1$ の水素量 (または重水素も) を吸収することにより定量的にその帯磁率を失い, これと同様に著者は Ni の 3d の電子穴中に $H \rightarrow H^+ + e$ の電子が入ることにより導磁率が減少するものとした。

(50) 柳沢, 関, 田中, 川瀬: 物理学会, 磁気分科会, 昭和 26 年 5 月講演, Stahl u. Eisen, **78**(1958), 50.

(51) B. Svensson: Ann. Physik, **18**(1933), 299.

(52) A. Sieverts & W. Danz: Z. Phys. Chem., **B 38** (1937), 61.

poor absorber の水素溶解において真の溶解熱 ($-\chi_s$) が V_i と反比例するという著者らの結果も $H = H^+ + e$ なる解離を考えると定性的に説明し得る。 V_i の大なる金属すなわち陽性の大なる金属ほど H^+ を取り難いのは当然である。結局水素溶解熱のこれ等の 2 群の金属のイオン化エネルギーとの関係が全く対称的なのはその溶解水素が positive および negative の形をとることと一致する。

V. 総 括

(1) アルカリ及びアルカリ土金属の水素溶解熱はその金属の陽性の大きさ即ちイオン化エネルギーに比例する。

(2) これに対し poor absorber 金属の水素溶解熱は金属のイオン化エネルギーと反比例する。

(3) 以上の対称的な現象は水素が上記 2 群の金属中においてそれぞれ H^- 或いは H^+ として溶存することの証明となる。