

# Al-Li 系 合金開發의 最近動向

The current status of aluminum-lithium system alloys

장 석 태

## 1. 序 論

航空機 構造用 素材로서 Al 合金은 가장 널리 사용되며 오래전부터 많은 새로운 合金開發이 試圖되었으나 1960年代까지는 2024 및 7075 合金의 T4, T6 材料가 主素材로서 사용되어 있었다. 그후 2024 및 7075 合金의 결점인 强度 및 耐蝕性의 개선이 熱處理등에 따라 進行되고, 그위에 高靱性의 要求와 더불어 2124, 2324, 7175, 7475, 7050 合金등의 高純度 地金 BASE의 合金이 實用化되고, 또 加工熱處理法도 개발되어 靱性의 향상이 icked졌다.

이 사이에, 固體中에 가장 가벼운 Lithium 을 Aluminum 에 添加하고 航空機의 輕量化에 연결하는 試圖가 몇번인가 이루어 졌다. 實際 航空機에 사용된 것도 있었으나 이 合金系가 갖고 있는 低靱性에서 종래의 2024, 7075 合金에 대체되는 主構造材로 되는것은 없었다.

1970年代의 오일쇼크 이후 燃料費가 뛰어난 航空機의 개발, 즉 그의 解決策의 하나인 機體의 輕量化가 종래보다 한층 강하게 要求되고, 이와 같은 機體材料의 高强度化, 高剛性化, 低密度化 등의 要求에 부응하기 위해서 기존의 Al 合金과 Tithan(Ti) 合金을 再評價하고, 또 FRP 나 FRM 등의 複合材料의 적극적인 研究開發이 이루어졌다. 그결과 Lithium 을 첨가한 Al 合金은 低密度, 高比强度, 高比剛性을 얻을 수 있는것, 素材製造, 機械加工, 組立作業등에도 장래의 技術이나 설비가 그대로 사용될 수 있는 것에서, 航

空機用 材料로서 그의 競合材料보다 극히 매력적이라고 생각되며 世界各國에서 研究개발이 行해지고 있다.

본 原稿는 주로 第1回~第3回 Al-Li 合金에 관한 國際會議에서 발표된 內容中에서 이 合金의 개발歷史 및 최근의 개발動向을 종합한 것이다. 또한 이 系列 合金의 전반에 대해서는 상세한 소개가 參考文獻에 있으므로 參照해 주시기 바랍니다.

## 2. Al-Li 系 合金開發의 歷史

### 가. 1920年代

Lithium 을 첨가한 Al 合金 開發의 歷史는 오래 되었으며 1920年代 초기에 西獨에서 최초의 Li을 함유한 Al 合金材의 市販材料가 개발되어 있었다. Scleron Alloy 라 칭해진 代表的 組成 Al-12 Zn-3Cu-0.6Mn-0.1Li 의 合金이며 당시의 듀랄루민보다 强度가 높다고 말했다. Scleron Alloy 와 Duralmin의 機械的 性質을 表 1에 나타냈다.

Scleron Alloy 는 鑄物 및 展伸材로 사용되었으나 亞鉛(Zn)이 12%나 포함되며 比重이 커서 實用범위는 原動機의 부품에 限定되었다. 이때 듀랄루민의 時効硬化, 復元現象에 대한 여러가지 理論이 展開되어, 이들 現象에 相變化가 중요한 역할을 하는것이 밝혀졌다.

1924년에는 일찍이도 Czochralski 등에 의해서 Al-Li 二元狀態圖의 연구가 이루어져 있었다. 이어서 1926년에는 Al-Cu-Li 등 많은 Li을 포함하는 Al 合金의 狀態圖가 報告되었다.

〈표 1〉 Scleron 과 Duralumin 의 機械的 性質

合金名	Scleron	Duralumin	
合金組成	Al-12Zn-3Cu -0.6 Mn-0.1Li	Al-4.2Cu-0.5Mg -0.6Mn	
熱處理	—	T4	T6
引張強度 (MPa)	392-490	412	417
0.2% 耐力 (MPa)	294	245	382
延伸率 (%)	10-15	23	7

나. 1930년대

時効硬化, 析出過程의 해명이 X線 回折法에 의해서 試圖되어, 1935년에 西獨에서 Wassermann 등이 Al-5%Cu 合金에서 中間相을 발견하고 1938년에는 英國에서 Preston 이, 또 프랑스에서 Guinier 가 各各 別個로 現在 말하는 G.P. Zone 을 발견했다. Li 을 含有하는 Al 의 연구도 이루어져 있다고 생각되지만 特記할 만한 報告는 없다.

다. 1940년대

1942년에 Alcoa 社의 LeBaron 이 2020合金의 基本이 되는 Al-Cu-Li 의 特許申請을 하고 있다. 1.6mm 두께의 Al-4.5Cu-1.0Li-0.8Mn-0.15Cd 合金板이며 溶體化處理후 160°C 에서 12 時間의 時効에 의하여 引張強度 567 Mpa, 耐力 523 Mpa, 延伸率 7.8%을 얻고 있으며 그의 우수한 機械的 性質이 주목되었다. 1945년에 特許를 받았다.

한편, 1940年 日本에 있어서 航空機用 Al 合金으로서 가장 傑作品인 合金의 하나인 7075 合金, 즉 超超듀란루민 (ESD)이 開發되었다.

라. 1950년대

英國에서 Hardy 와 Silcock 에 의해서 Al-Li 이나 Al-Cu-Li 合金의 時効析出에 관한 기초적인 연구가 이루어졌다. 특히 Silcock 는 Al-Li 合金의 析出過程을 X線 回折法으로 조사하고, 規則相 δ'-Al<sub>3</sub> Li 相의 存在를 규명하고 있다.

美國에서는 Li 을 含有하는 Al 合金의 航空機 《國防과 技術 1986. 6》

로에의 적용이 많이 계획되어 1957년에는 Alcoa 社의 X2020 合金 (Al-4.5Cu-1.1Li-0.5Mn-0.2Cd)이 처음으로 航空機用 構造材料로서 海軍의 RA-5C Vigilante 에 사용되었다. 이 時點에서 Alcoa 社가 Li 添加에 의한 彈性率 向上效果를 알고 있었는지는 불분명하지만 X2020合金의 高強度, 低密度, 특히 高壓縮強度, 高剛性を 買物로 航空機에의 適用을 試圖했다.

Alcoa 社는 I/M 法 (Ingot Metallurgy) 으로 板을 제조하고 있으며 製造上의 諸問題, 즉 溶解, 造塊, 加工에서의 여러 문제에 직면하고 있었으나, X2020 合金의 특성에 航空機 製造業體가 착안하고, 1960年代 초기에는 超音速爆擊機 B-58 과 戰鬥機등에 사용되었다.

마. 1960년대

그후 X2020 合金의 機械的 性質이 상세하게 調査되었으며, 靱성이 낮은것, 특히 -notch에 대한 感受성이 7075-T6보다 큰것이 문제로 되었다. 이것때문에 1965年 이후는 이 合金을 새로운 航空機用 構造材로서 사용하는 것은 없어졌다. 그러나 Alcoa 社에서는 이 X2020 合金의 低靱性改善을 위해서 연구를 계속하여, 今日的 Li 을 含有하는 Al 合金 開發품의 불을 붙이는 役割이 되었다.

한편, 소聯에서도 Li 을 添加한 Al 合金의 개발이 이루어져, 1965년에는 Fridlyander 등에 의해 Al-Mg-Li 三元狀態圖와 여러가지 合金의 機械的 性質이 調査되어 代表的인 組成 Al-5Mg-2Li-0.5Mn 의 01420 合金이 개발되었다.

表 2에 01420 合金의 組成範圍와 機械的 性質을 나타냈다. 그후 소聯은 Li 을 含有한 Al 合金 개발에 힘을 쏟아 Al-Zn-Mg 合金에 Li 을 添加한 溶接 構造用 材料의 개발을 하고 있었다.

1960年代 후반에는 Al-Li 合金의 析出過程을 透過電子顯微鏡에 의해 調査가 가능해져, Silcock 에 의하여 그 存在가 示唆되고 있음에도 불구하고 지금까지 무시되어있던 規則相 δ'相의 존재가 日本人에 의하여 동일하게 인정되었다. Li<sub>2</sub> 構造의 δ'相을 갖는 Al-Li 合金의 變形에 있어서 超格子 轉位の 존재가 日本의 研究팀에 의하여 밝혀져 強度의 逆溫度依存性에 대해서도 그 존재

가 나타났다.

〈표 2〉 소련 01420合金組成과 機械的 性質

合金組成範圍	機械的 性質	
Mg 4~7	引張強度 (MPa)	448-483
Li 1.5~2.6	耐 力 (MPa)	310-345
Mn 0.2~1.0 및 또는		
Zr 0.05~0.3	延伸率 (%)	8-10
Ti 0.05~0.15	彈性率 (MPa)	$73.8 \times 10^3$
Cr 0.05~0.3		
Al 나머지		

바. 1970年代

1971年, 英國의 Fulmer Research Institute 는 새로운 Al-Mg-Li-Zr合金의 개발을 宣言했다. 이어서 곧 美國에서도 Alcoa Technical Center 가 Al-Mg-Li合金의 개발에 착수했다. Alcoa社는 2020合金개발의 경험에서, 低靱性, 粒界破壞의 개선을 主眼點으로 하였다.

美國, 英國을 중심으로 Al-Li合金의 破壞靱性에 關하여 많은 연구가 이루어져 1970年代 후반에는 低靱性을 개선할 목적으로 粉末冶金法,

P/M法(Powder Metallurgy)에 의한 Al-Li合金開發이 Massachusetts Institute of Technology, Lockheed社를 中心으로 精力的으로 수행되었다. 또 후반에는 世界的인 油일쇼크에 따라 航空機機體材料의 輕量化가 요청되어 Li을 含有하는 高比強度, 高彈性率 Al合金의 개발에 박차가 걸렸다.

사. 1980年代

이와같은 時代를 배경으로 1980年 5月 美國 Georgia에서 第1回의 Al-Li合金에 關한 國際會議가 개최되었다. 이 會議의 Proceedings를 보면 그 內容은 Li資源등의 總說이나 合金의 製造, 또는 粉末冶金에 關한것이 많다. 또 새로운 Li을 含有한 Al合金의 實用化의 길이 멀다는 느낌을 얻었다. 특히 주목되는 것은 粉末冶金에 關한 발표가 전체의 21編중에 1/3인 7編을 차지하고 있다는 것이다.

이어서 第2回 Al-Li合金에 關한 國際會議가 재차 美國의 California에서 1983年 4월에 개최되었다. 發表論文數도 38編으로 第1회보다 2배 가까이 되고 그 내용도 구체화되었다.

歐美諸國의 合金開發目標가 명확하게 어떤 合

〈표 3〉 Al-Li系 合金의 開發目標 (1982年 12月當時)

製造方法	會社名	開發目標合金				備考
		低強度合金	中強度合金	高強度合金	損傷許容合金	
I/M法	Alcoa/Boeing	2024-T3 -10%ρ		7075-T6 -7%ρ	2324-T39 -9%ρ	1984年開始 1985年供給豫定
I/M法	Alcan, RAE	2024-T3 -10%ρ	201-T6 -10ρ	7075-T6 -10%ρ		1978年開始
I/M法	Alcoa/NAVAIR	2024-T3 -10%ρ		7075-T6 -8%ρ		
I/M法	CALAC/NASA	2024-T3		7075-T76		1980年開始
P/M法		-10ρ		+10 20%σ +8%E +10% Fatigue		
P/M法	LMSC/DARPA		7075-T76 +30% E/ρ	7075-T76 +20% E/ρ +20%σ <sub>y</sub> /ρ		1978年開始
P/M法	Boeing/AFWAL	2024-T3 -T4 -10%ρ	7075-T73 +30% E/ρ	7075-T73 +20% E/ρ +20% σ <sub>y</sub> /ρ		1982年開始

RAE: Royal Aircraft Establishment, LMSC: Lockheed Missile and Space Company, NAVAIR: Naval Air Systems Comand, DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency, CALAC: Lockheed-California Company, AFWAL: Air Force Wright Aeronautical Laboratories, NASA: National Aeronautics and Space Administration.

금의 어떤 性質을 어떤 위치까지 개선하는가 구체적인 숫자를 제시하였다.

1982年 2月 時點에서 各會社의 I/M法 및 P/M法에 의한 開發目標의 대표적인 例를 表 3에 표시하였다. 低強度 合金에서는 各會社도 2024-T3와 같은 程度의 機械的 性質을 갖고, 약 10%의 密度輕減을 目標로 하고있다.

中強度 合金에서는 I/M法은 2014-T6의 10% 密度輕減, P/M法은 7075-T76-T73의 30% 比彈性率向上을 目標로 하고있다. 또 高強度 合金에서는 I/M法으로 7075-T6와 같은 程度의 強度를 갖고, 약 7~10%의 密度輕減을 노리고 있다. P/M法에서는 比彈性率 및 比強度의 20% 개선을 目標로 하고있다. 表 4에 Boeing/AFW-AL에 의해 具體的인 P/M法에 따라 合金開發의 目標를 제시하였다. Li을 含有한 超塑性 合金, 耐熱合金의 개발도 계획되어 있다.

〈표 4〉 Boeing 社의 P/M法에 의한 AL-Li系 合金의 開發目標

開發目標合金	相當 合金	改良 目標
低密度合金	7075-T73와 同程度의 強度 및 諸性質	密度 11%減 彈性率 11%向上
高強度合金	7075-T651와 同程度의 強度, 損傷許容 및 耐蝕性	密度 9%減 彈性率 9%向上
損傷許容合金	2024-T351와 同程度의 強度, 損傷許容 및 耐蝕性	密度 10%減 彈性率 10%向上
超塑性合金	7075-T73와 同程度의 強度, 諸性質 超塑性合金	密度 9%減 彈性率 9%向上
耐熱合金	2219-T8와 同程度의 強度 및 高溫特性	密度 8%減

第2回의 國際會議의 특징은 조직과 機械的 性質에 관련된 論文이 증가하고 溶解에 관한 論文은 감소한 반면 實際製造品의 諸特性을 조사한 論文이 많아지고 있고, 또 처음으로 이 合金系列의 超塑性, 高溫變形, 溶接性등을 취급한 論文이 등장했다는 것이다.

### 3. Al-Li系 合金開發의 現狀

#### 가. 第3回 Al-Li 合金에 관한 國際會議

1985年 7月 英國 Oxford에서 第3回 國際會議

《國防과 技術 1986.6》

가 개최되어, 世界各國의 業體, 使用者, 大學, 研究機關에서 많은 技術者, 研究者가 모여서 Al-Li 合金에 대한 관심도가 높게 나타났다.

65件의 研究發表가 있고 15件의 Poster Section이 行해졌다. 表 5에 研究發表의 內容을 분류하여 表示하였다. 發表內容의 상세에 대하여 다음해 봄 Proceedings으로서 出版될 예정이다.

〈표 5〉 第3回 國際會議의 講演內容

1 總論	2
2 生産, 製造	5
3 金屬組織	6
4 強化機構	6
5 組織 및 性質	12
6 高溫特性	4
7 粉末冶金	8
8 高溫變形	5
9 疲勞	4
10 腐蝕, 酸化	4
11 應力腐蝕	2
12 溶接, 接合	6
計	64

#### 나. 各會社의 開發狀況

1985年 현재 개발중인 Li添加 合金을 분류하면 Al-Cu-Li系(2090), Al-Cu-Mg-Li系(8090, 8091)로 大別된다.

##### a) Alcoa(美國)

Alcoa社는 商品名 Alithalite로 불리어진 3種類의 Al-Cu-Li-Zr系 合金을 개발하였다. Alithalite-A 合金은 損傷許容(Damage Tolerance)를, -B 合金은 高比強度化를, 또 -C 合金은 低密度化를 主開發目標로 두고있다.

Alcoa社에는 I/M法으로 400mm×1,270mm×3,300mm인 約 4,500kg의 鑄塊를 製作하기 위하여 Pilot Plant를 1985年 3/4分期까지 개시하도록 되어있다. Alithalite -B合金(2090)의 合金組成範圍를 表 6에, 또 -B合金 T8材의 機械的 性質을 表 7에 제시했다. -B合金은 종래의 7075-T6X와 같은 정도의 強度를 갖고, 또한 低密度化가 되도록 表 7중에 그 開發目標值도 제시되었다.

〈표 6〉

Alcoa社 Alithalite B(2090)의 합금組成範圍

(wt%)

	Li	Cu	Mg	Zr	Fe	Si	Al
Alithalite B(2090)	1.9 - 2.6	2.4 - 3.0	<0.25	0.08 - 0.15	<0.12	<0.08	殘

〈표 7〉 Alcoa社 Alithalite B-T8材의 機械的 性質

	目標值	48mmt	38mmt
引張強度(MPa)	524	558	569
耐 力(MPa)	476	510	530
延 伸 率(%)	6(L)	12	7.9
破壞韌性, K1c	22	38.5	42.5
彈 性 率(GPa)	77	79.8	79.8
密 度(g/ml)	<2.60	2.56	2.56

b) Alcan International(英國)

유럽에서는 Mg을 함유한 Al-Cu-Mg-Li-Zr系로서 開發目標을 Clear 되도록 되어 있다. Alcan社는 合金 Lital-A, -B, -C라 命名되었고 -A 合金은 中強度合金으로 2014-T6, -T8을, -B 合金은 高強度合金으로 7075-T6을, 또 -C 合金은 損傷許容, 즉 耐疲勞 特性的 우수한 合金으로 2024-T3, -4를 目標로 각각의 機械的 性質을 손상시키지 않고 10% 密度低下, 또한 10%의 彈性率 향상을 目標로 하고 있다.

表 8에 Lital-A, -C(8090) 및 Lital-B(8091)의 合金組成範圍를 제시한다. Lital-A에 대해

〈표 8〉 Alcan社의 Lital A, B, C의 合金組成範圍 (wt%)

	Li	Cu	Mg	Zr	Al
Lital A, C (8090)	2.3 - 2.6	1.0 - 1.6	0.5 - 1.0	0.08 - 0.16	殘
Lital B (8091)	2.4 - 2.3	1.6 - 2.2	0.5 - 1.0	0.08 - 0.16	殘

〈표 9〉

Pechiney社 8090 合金의 開發目標 및 合金組成

合 金	開 發 目 標		組 成 (wt%)				
	密 度	彈 性 率	Li	Cu	Mg	Zr	Al
8090 -CP271	10% 減	20% 增	2.2 - 2.7	1.0 - 1.6	0.6 - 1.3	0.04 - 0.16	殘
8090 -CP274	8% 減	15% 增	1.7 - 2.3	1.8 - 2.5	1.1 - 1.9	0.04 - 0.16	殘
8090 -CP276	8% 減	17% 增	1.9 - 2.6	2.5 - 3.3	0.2 - 0.8	0.04 - 0.16	殘

서는 이미 3,000kg의 鑄塊를 만들어서 0.8mm의 Sheet 製作이나  $\phi$ 300mm의 Billet의 押出加工도 하였고, 1985年 第 3/4分期 까지는 板, 棒, 形材등 모든 제품을 공급하기로 되었다.

\* 현재 日本 輕金屬學會의 研究部會材料: 物性部會에서 이 Alcan社의 Lital-A(8090) 合金과 같은 合金을 共通試料로서 여러가지 物性試驗을 하고 있다.

c) Pechiney(프랑스)

프랑스의 Pechiney社는 Mg을 含有한 8090 合金으로 密度輕減, 比彈性率向上을 目標로 한다. 表 9에 개발目標로 하는 3種類의 Al-Cu-Mg-Li-Zr 合金의 目標로 하는 密度輕減率, 比彈性率 向上率과 各合金의 組成範圍가 제시됨. I/M法으로 800mm×300mm의 크기의 約 1,500kg의 鑄塊를 제작하여 1.6mm 두께의 Sheet가 공급된다. 表 9중의 高強度 合金 8090-CP276 押出材의 押出된 그대로(F상태) 혹은 T651材의 機械的 性質을 表 10에 表示되었다. 7075-T6에 비하여 延伸率값이 약간 낮지만 強度는 아주 뛰어나다고 말할 수 있다.

〈표 10〉 Pechiney社 8090-CP 276 押出材의 機械的 性質

	押出된  상태	-T651
引張強度(MPa)	600	655
耐 力(MPa)	575	625
延 伸 率(%)	-	5
彈 性 率(GPa)	-	80.5

d) Reynolds(美國)

Reynolds社에서 개발중인合金의 代表的合金組成은 表 11과 같다.

〈표 11〉 Reynolds社에서 시행한 開發合金例 (wt%)

合金	Li	Cu	Mg	Zr	Fe
2090	2.3	2.5	—	0.13	0.07
8090	2.6	1.4	1.0	0.14	0.05
8091	2.3	2.1	0.7	0.14	0.08
8090系	2.9	1.5	2.0	0.16	0.06

e) 其他

Royal Aircraft Establishment(英國)는 7075-T6나 7010/7050-T76와 다른 高强度合金으로서 10% 密度輕減, 또한 10%의 剛性向上을 목표로 表 12에 나타난 各合金을 개발하고 있다.

Boeing社는 여러가지 P/M法에 따라 제작된 Al-Li合金의 延性을 調査하고 있다. 表 12에는 各各의 方法으로 제작된 粉末에 의한合金의 延伸率 값을 제시하였다.

Boeing社는 P/M法에 따라 Li添加合金으로써 약 4.5% Li을, 그의 Al-Li-Be合金이 有望하다고 본다. 현재 P/M法에 의한 Li添加合金의 實用화는 되어 있지 않지만 尙래 1990年경에는 實用이 實現되리라 예측되어진다. 그와 관련하여 Boeing社는 I/M法에 의한合金에 대해

〈표 12〉 여러가지 P/M法으로 작성된 Al-Li合金의 延伸率 값

	Atomizing	Mechanical alloying	Melt spinning
延伸率 (%)	3.5	9.5	6.0

〈표 13〉 Royal Aircraft Establishment(英國)에서 施行한 開發合金과 그의 機械的性質

合金	合金組成 (wt%)				機械的性質		
	Li	Cu	Mg	Zr	引張強度 (MPa)	耐力 (MPa)	延伸率 (%)
合金-1	2.4	1.2	0.5	0.1	430	380	5
-2	2.5	1.4	1.0	0.1	510	430	3
-3	2.3	2.0	0.6	0.1	490	395	8
-4	2.5	2.0	0.8	0.1	510	420	5
-5	2.8	1.8	1.0	0.1	520	450	3

여 Li量을 2.0~2.6%인 범위가 有望되고 1986년에는 實用이 가능하리라 예측된다.

P/M法에 관하여 McDonnell Douglas Research Laboratories에서도 研究하고 있으며 P/M法에 의하여 얻어진 Al-4Li-0.2Zr合金은 7075-T76511과 같은 程度의 機械的性質을 갖고, 또한 約 14%의 密度輕減이 달성되었다.

4. 終言

Al-Li系合金開發의 歷史와 最近動向에 대하여 기술하였다. 현재 Al-Li系合金에 대하여 세계적으로 굉장히 많은 興味와 관심을 갖고 있다. Al-Li系라고 하는 單一의合金으로 國際會議이 개최되어진것은 진기한 일이지만, 벌써 3회가 開催되었고, 또 이번 會議에서 2年후 1987년에 파리에서 第4回째의 會議이 개최될것을 결의하였다.

Al-Li系合金開發은 바야흐로 중반으로 향하는 느낌이다. 새로운 2090(Al-Cu-Li-Zr系), 8090/8091(Al-Cu-Mg-Li-Zr系)가 規格化 되어지고 있다. I/M法에 따른 製品의 實用화는 今年中에 實現되어 工場規模로의 생산이 개시되어진다. P/M法에서도 精力的인 연구가 시도되어 1980年代의 중반까지는 製品의 實用화가 되어지리라 예측된다.

紙面全體에는 이 系列合金의 彈性率, 規則相 δ'-相의 析出, 規則相 δ'相과 超格子 轉位, 析出硬化, 應力腐蝕龜裂, 破壞靱性, 高溫變形등 기본적이것, 또 흥미깊은 사항에 언급하는 것을 넓힐 수가 있지만 사정이 허락하는대로 별도로 기회가 오면 하겠다.

## 참고 문헌

- 1) T.H. Sanders, Jr. and E.A. Starke, Jr. ed.: *Proceedings of the 1st International Aluminum-Lithium Conference, Met. Soc. AIME* (1981).
- 2) T.H. Sanders, Jr. and E.A. Starke, Jr. ed.: *Proceedings of the 2nd International Aluminum-Lithium Conference, Met. Soc. AIME* (1983).
- 3) T.H. Sanders, Jr. and E.A. Starke, Jr. ed.: *Abstracts of the 3rd International Aluminum-Lithium Conference*, (1985) Oxford.
- 4) 日本航空宇宙工業會：革新航空機技術開發センター企劃委員會調査報告書(1985.3).
- 5) 古川, 美浦, 根本：日本金屬學會報, 23(1984), 172.
- 6) E.S. Balmuth and R. Schmidt: *Proceedings of the 1st International Aluminum-Lithium Conference*, T.H. Sanders, Jr. and E.A. Starke, Jr. ed., *Met. Soc. AIME* (1981), 69.
- 7) 幸田成康：合金の析出, 丸善, (1972), 1.
- 8) J. Czochralski and E. Rassow: *Modrne Metallkunde.*, (1924), 36.
- 9) P. Assman: *Z. Metallkunde.*, 18(1926), 51, 256.
- 10) G. Wassermann and J. Weerts: *Metallwirt.*, 14 (1935), 605.
- 11) A. Guinier: *Nature*, 142 (1938), 569.
- 12) G.D. Preston: *ibid* 570.
- 13) I.M. LeBaron: U.S. Patent No. 2381219(1942).
- 14) 五十嵐, 北原：特許135036號(1940).
- 15) H.K. Hardy and J.M. Silcock: *J. Inst. of Metals*, 84 (1955~56), 423.
- 16) J.M. Silcock: *ibid.*, 88 (1959~60), 357.
- 17) I.N. Fridlyander, V.F. Shamray and N.V. Shiryayera: *Russian Metallurgy*, 2 (1965) 83.
- 18) T. Yoshiyama, H. Hasebe and M. Mannami: *J. Phys. Soc. Japan*, 25 (1968), 908.
- 19) 田村, 森, 中村：日本金屬學會誌, 34(1970), 919.
- 20) M. Tamura, T. Mori and T. Nakamura: *Trans. JIM*, 14 (1973), 355.
- 21) W.E. Quist, G.H. Narayanan and A.L. Wingert: *Proceedings of the 2nd International Aluminum-Lithium Conference*, T.H. Sanders, Jr. and E.A. Starke, Jr. ed., *Met. Soc. AIME* (1983), 313.
- 22) P.E. Bretz and R.R. Sawtell: *Abstracts of the 3rd International Aluminum-Lithium Conference*, (1985) 5.
- 23) M.A. Reynolds, E. Creed and A. Gray: *ibid.*, 6.
- 24) Ph. Meyer and B. Dubost: *ibid.*, 4.
- 25) R.F. Ashton, D.S. Thompson and E.A. Starke: *ibid.*, 7.
- 26) P.J. Gregson, G.J. peel and B. Evans: *ibid.*, 64.
- 27) W.E. Quist, G.H. Narayanan, A. L. Wingert and T.M.F. Ronald. *ibid.*, 20.
- 28) P.J. Mescher, F.J. Lederish and J.E. O'Neill: *ibid.*, 42a.

