米国における鉛フリーはんだ研究の動向

Carol Handwerker*

1. NCMS 鉛フリーはんだプロジェクト

1997年、国立生産科学研究所 (NCMS: National Center for Manufacturing Sciences) 主導の鉛フリーはんだプロジェクトが11の会社や国立研究所(AT & T/Lucent Technologies, the Navy's Electronics Manufacturing Productivity Facility (EMPF), Ford Motor Company, GM\Delco Electronics, GM\Hughes Aircraft, the National Institute for Standards and Technology(NIST), Rensselaer Polytechnic Institute (RPI), Rockwell International, Sandia National Laboratories, Texas Instruments, United Technologies\Hamilton Standard)からなるコンソーシウムによって4年間の研究を終了した。このプログラムは、国内外の電子機器における鉛規制に対応することを主目的として始められた。鉛含有はんだは、今日、電子工業界で広範囲に根付いており、法的規制は深刻に受け止められている。全ての生産設備はSn-Pb共晶はんだに対して最適に設計されており、鉛フリー化への転換コストと信頼性に対する影響は十分に理解することが必要とされる。日本における鉛フリー化の動きとEUのWEEE指令のエレクトロニクスにおける鉛使用禁止が検討されている事実とともに、このプロジェクトの結果は、我々に代替材料選択、プロセス、設備変更への有用な情報を提供してくれる。

NCMS プロジェクトの最終目標は、安全で、信頼性があ

り、無毒で経済性を満足する代替材料が存在するかどうかを明確にすることにあった。即ち、生産者たちが、鉛フリーはんだの材料物性、プロセス条件と設備、毒性の影響、合金価格、長期供給性、信頼性を理解することが要求されるための回答を与えるものである。

プロジェクトの詳細なレポートが発刊されているが⁽¹⁾、その主な結果は、以下にまとめられる。

- 鉛フリーはんだの適用対象の推薦
- 価格と供給性を反映した合金組成ガイドライン
- 7種類のダウンロード選択合金のデータベースとSn-Pb共晶合金との比較
- その他の70種類の限定された特性データ
- 様々な試験基板を用いた最適プロセス条件
- 選択された合金と種々の表面処理の反応の金属学的な反応解析と強度評価
- 4種類の選択された合金の熱疲労評価と寿命予測(寿命予測ソフトはNCMSプロジェクト所有)
- 無毒性合金組成に関するアセスメント

本プロジェクトのエレクトロニクス業界に対する長期的メリットは、生産における情報や製品の性能を含んだ候補合金の材料物性データベースを築いたことにあるだろう。プロジェクトに掛かった経費はおよそ10,000,000ドルで、他に主に米国防衛庁より1,000,000ドルが支給されている。

* アメリカ標準化技術研究所金属材料部長

NCMS Lead-Free Soldering Project and NEMI Lead-Free Task Force; C. Handwerker (National Institute of Standards and Technology Gaithersburg MD 20899-8550, USA. [redacted])

Keywords: lead-free, soldering, NCMS project, NEMI project

† 菅沼克昭(訳): 大阪大学教授; 産業科学研究所(〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘8-1) 1999年10月7日受理

(1) プロジェクトの目標

代替材料の選択には、様々な面から候補となる合金の詳細な評価が必要である。第1ステップとして、メンバー達の方針に依存する広範囲な応用に対応するように以下の温度範囲設定がなされ、条件に適合する候補合金の材料特性限界を明らかにした。

- 一般電化製品：-55~100°C
- 防衛関連：-55~125°C
- 宇宙・自動車関連：-55~180°C

まず、初期にリストアップした候補合金から、以下の条件で不適合合金の篩い落としを行った。(1)毒性元素を含むものを除外、(2)組成の類似したものを統一、(3)プロジェクト参加者のカテゴリ外の合金を削除、(4)更にこれら条件に重み付けをする。初期合金の篩い分けプロセスを図1に示した。

(2) 結果の要約

初期のスクリーニング結果は、以下のようである。

毒性：Cdは多くの形態で毒性を持ち、ヨーロッパでの規制は厳格であり、除外する。他の元素に関しては、データが不完全であり矛盾も見られるので、ここでは除外の対象にはしない。残った元素は、Sn, Ag, Bi, In, Cu, Sb(マイナー元素として), Znとなる。1%以下の他元素の添加は、環境負荷は小さいと考える。

経済性・供給性：世界全体への供給性と価格(\$10/lbを越えない)の要求から、合金中にInは1.5%, Biは20%を越えてはならない。ただし、Sn-Bi共晶合金は基本合金とする。Inフリー合金のペーストであれば、Sn-Pb共晶合金の5%程度アップになる。ただし、フロー用の棒状合金の価格はInフリーに対しても大きくなる。

生産性・信頼性：生産性などへ及ぼす物性として、液相線温度、固液共存温度範囲、ぬれ性、機械的性質を表1のよう

に考慮した。まず、液相線が225°C以下で固液共存領域が30°C以内の条件から、可能な組成はかなり限られる。図2に示すSn-Ag-Bi合金の場合で30°C以内の固液共存範囲を示す斜線の範囲が相当し、液相線の条件から更に組成は絞りこまれる。更にぬれ性や熱疲労特性などの条件を附加することで、79種類の合金から最終的に7つの合金が各種評価対象に選ばれた(表2)。Sn-Biは、唯一低温はんだ付け合金として残った。また、Sn-2.8Ag-20In合金は、価格と供給性から条件から外れるが、Sn-Pb共晶合金と同等の液相線を持つことから残された。

表1 第1段階ふるい分けの条件.

性 質	定 義	許容範囲
液相線温度	合金が完全に溶ける温度	<225°C
固液共存領域	液体と固体が共存する温度範囲	<30°C
ぬれ性	銅線を浸したときのぬれ挙動. ぬれ力が0および最大値の2/3となる時間	$F_{\max} > 300 \mu\text{N}$ $t_0 < 0.6 \text{ s}$ $t_{2/3} < 1 \text{ s}$
被覆性	浸漬テストで被覆される割合	>85%
ドロス	一定時間にはんだ表面に形成する酸化膜量	訂正評価
熱疲労 (TMF-1)	破壊に至るまでの時間でSn-Pbとの比較したときの割合	>75%
熱膨張係数 (CTE)	素材の熱膨張差は熱疲労へ影響する	<29 ppm/°C
クリープ	室温で10000時間で破壊する荷重	>3.4 MPa
延び	室温における単軸引張の破断延び	>10%

図1 NCMS プロジェクトにおける鉛フリーはんだ評価の流れ。

図2 Sn-Ag合金の液相面温度におよぼすBi添加の効果。灰色の部分で固液共存領域が30°Cの範囲にある。

表2 7つのダウンセクション.

コード	組成と液相線温度	
A1	Sn-37Pb	183°C
A4	Sn-3.5Ag	221°C
A6	Sn-58Bi	139°C
E4	Sn-3Ag-2Bi	220°C
F2	Sn-2.6Ag-0.8Cu-0.5Sb	211°C
F17	Sn-3.4Ag-4.8Bi	210°C
F21	Sn-2.8Ag-20In	187°C
F27	Sn-3.5Ag-0.5Cu-1Zn	221°C

表3 熱疲労条件.

条 件	温度範囲 (°C)	昇温速度 (°C/min)	保持時間 (min)	1日のサイ クル数	総サイクル数 (Cycles)
Profile 1	0~100	10	5	~48	6673
Profile 2	-55~125	11	20	~20	5000

生産性評価の試験は、標準基板(STV: Soldering Test Vehicle)を用いて評価した。その結果、全ての合金が大きな問題を示さず、許容範囲の生産性を示すことが分かった。ぬれ性に関しては、Sn-Pb 共晶に匹敵するものはないが、Ni/Au 表面処理を Cu 上に施すことで十分なぬれが得られた。

この結果から、鉛フリー化のためには基板のデザインやプロセス条件の変更が必要になる。また、フローはんだ付けでは、基板下部では十分なぬれが得られるが上部へのぬれ上がりは小さい。従って、温度の制御が微妙に要求される。即ち、プロセス・ウィンドウが狭くなることを余儀なくされる。

STV スルーホール基板の断面観察から、フィレット・リフティング(リフトオフ)が多数観察された。フィレット・リフティングは、組成(固液共存温度域)に強く影響を受ける。ただし、これが信頼性へどう影響するのかわからない。

信頼性の試験は、スルーホール基板(TH: Through Hole)と表面実装基板(SM: Surface Mount)の両基板(RTV: Reliability Test Vehicles)で行った。条件は、-55~125°C(軍事、自動車が対象)、0~100°C(電話や家電が対象)である⁽¹⁾。全ての部品で、表面処理は鉛フリーとした。RTV-SM には、FR-4 多層基板を用いた。部品(PLCC, BQFP, LCCC, 1206抵抗, 1206コンデンサ)は、それぞれを基板の中央と周辺に条件が同様になるように配置した。一合金 10320接続点に対し、熱疲労中の導体抵抗変化を表3の条件でモニターした。

破壊が生じたのは、LCCC と1206抵抗のみであり、概して鉛フリーはんだは Sn-Pb 共晶はんだ以上の特性を示した。1206抵抗の破壊に関するワイブルプロットを図3に示す。

図3 FR4 基板上の1206抵抗の熱疲労破壊の3母数ワイブルプロット.

(a) 0~100°C, 30 min/サイクル, 5 min 保持

(b) -55~+125°C, 72 min/サイクル, 20 min 保持

A1 —Sn63Pb37

A6 —Bi52Sn48

F2 —Sn96Ag2.6Cu0.8Sb0.5

F21—Sn77.2In20Ag2.8

A4 —Sn96.5Ag3.5

E4 —Sn95Ag3Bi2

F17—Sn91.8Ag3.4Bi4.8

F27—Sn95Ag3.5Zn1Cu0.5

また、主な結果をまとめると以下のようなものである。

0~100°C間熱疲労：6673サイクルで破壊は0~11%である。

1. F17は、全く破壊しなかった唯一の合金になる。
2. A6は、1%以下の破壊率で、第1ランクとなる。
3. A1, A4, E4は2-5%の破壊率で、第2のグループとなる。
4. F2, F21, F27は、8-11%の破壊率で、最もランクは低い。

-55~125°C熱疲労：5,000サイクルまでの破壊率は、4~57%に到った。

1. A6は、4%破壊の第1のランクとなる。
2. A1とF17は、13-16%破壊の第2グループとなる
3. 残る5種の合金は、54-57%破壊となる。10%破壊レベルで比較すると、A4, E4, F2, F27は同レベルとなる。F21は僅かに低い。

以上の試験結果から、ランキングははんだ、部品、基板の熱応力に依存することが分かる。1206抵抗はF17(Sn-3.4Ag-4.8Bi)による接続で特性がSn-PbやSn-Biの共晶合金より悪いが、ほとんどの鉛フリーはんだはPQFP, PLCCや1206コンデンサでは全く問題がない。最終的には、Sn-58Bi共晶、Sn-3.4Ag-4.8BiおよびSn-3.5Ag共晶の3種の合金が

表4 表面実装に推薦できる3合金。

合 金	液相線 固相線	適用範囲	注 意 事 項
Sn-58Bi	139°C (eutectic)	一般家電製品 携帯電話	低温で実装可能・共晶組成であるが耐熱性は問題。 表面実装では Sn-Pb より優れた熱疲労特性を持つ。 スルーホールでは, CPGA-84は Sn-Pb より良いが, CDIP-20では悪い。
Sn-3.5Ag-4.8Bi	205~210°C	一般家電製品 携帯電話 宇宙・航空 自動車	表面実装では 0°Cから100°Cの範囲で Sn-Pb 共晶はんだより優れる。-55°Cから+125°Cでは Sn-Pb より良好。 スルーホールでは, ほとんどの場合リフトオフが生じる。
Sn-3.5Ag	221°C (eutectic)	一般家電製品 携帯電話 宇宙・航空 自動車	単純2元共晶 表面実装では, 0~100°Cでは Sn-Pb と同等であるが, -55~+125°Cでは悪い。 スルーホールでは, 他の高 Sn 合金よりはリフトオフの発生は少ない。Sn-2.6Ag-0.8Cu-0.5Sb に関しては, 未だに信頼性は不明確。

Sn-Pb 合金よりも優れたものとして判断された(表4)。Sn-58Bi 共晶と Sn-3.5Ag-4.8Bi は Sn-Pb 以上の特性を示す。Sn-3.5Bi-4.8Bi は, 1206抵抗の表面実装で 0~100°Cの熱疲労で唯一破損がない合金で, -55~125°Cの熱疲労では Sn-Pb 共晶と同等の特性を示した。Sn-58Bi は, Sn-Pb 共晶以下の破壊率を示した。

本プロジェクトの結論は, (1)代替合金としての唯一の選択肢は無い, (2)推薦される合金に対してより多くの情報が必要であるの2点である。残された問題として, 以下の3点が挙げられる。

1. 基板, 部品, 他の材料が, 要求される温度上昇に対応出来るか? これらの多くのものは, 220°C近傍を最高温度として設計されており, 240~260°C対応ではない。不可能な場合には, 新しい材料の開発が必要になる。多くのプラスチック・パッケージ部品は, 耐えることが出来ない。
2. ぬれ性の低さは, 生産性, 信頼性にどう影響するか? 実装の条件は理想から離れているので, どのようにプロセス・ウィンドウを設定するべきか。表面処理の設定も含まれるが, 高温対応のフラックスも必要である。
3. 鉛フリー実装の信頼性は, 現状で Sn-Pb 共晶で行われている全ての分野に対してどうなのか? 本研究で行われた実験は, 部品の種類, 条件などが限られている。より多くの部品に対し, 実装形態を考慮しながら信頼性の確認を急ぐ必要がある。

2. NEMI 鉛フリーはんだプロジェクト(NEMI Task Force on Lead-Free Soldering)

本年に入り NEMI(The National Electronics Manufacturing Initiative)は, 鉛フリー実装へ対応するための実装業界団体(NEMI Task Force)を組織した。この組織の活動主目的は以下の点にある。

- 2004年の鉛全廃を視野に入れ, 2001年には鉛フリー製品

を生産する能力を持つ。

- 鉛フリーはんだ実装のために用いることの出来る部品, 材料, プロセス条件を明らかにする。
- Sn-Ag-Cu 系はんだから一つの主力候補を選ぶ。
- 部品メーカー, 材料メーカー, 装置メーカーとの協力により, 最高260°C近くの高温度での実装へスムーズに移行出来るよう確認する
- 鉛フリープロセスの評価基準を確立する

このプロジェクトでは, リフロー・フローや洗浄・リペアなどの観点を持ち, 鉛フリー実装のためのプロセス・材料条件に関して研究を行う。このために, 多くの領域からの参加を募っており(電機メーカーばかりでなくコンデンサやMCM チップ部品, 基板などのメーカーを含める), 現在も日に日に増加している。例えば, Celestica, Compaq, Delphi/Delco, Hewlett Packard, Motorola, NIST, Nortel Networks, Sollectron, Visteon などである。また, NEMIは EIA, IPC, JEDEC などの団体とも重複の内容に関しては協力し合っている。NCMS, DTI, IDEALS などの国家プロジェクト, 国際プロジェクトで得られた情報は, 最終の選択へ向けて共有する方向で動いている。また, 他のプロジェクト(HDPUG(High Density Packaging User Group), and IEEC(State University of New York-Binghamton))などとも有用な情報交換を行っている。より詳しい情報は, Motorola の Edwin Bradley 氏 [REDACTED] か NEMI の Bob Smith [REDACTED] 氏へ直接お尋ねいただきたい。

文 献

- (1) NCMS Lead-Free Solder Project Final Report, NCMS, Ann Arbor, MI, August, 1997. To obtain a copy of the report and the CD-ROM archive from NCMS, contact NCMS (Barbara Johnson) at 734-995-4938 or go to the NCMS Website: <http://www.ncms.org/3portfolio/1ProjectPortfolio/pubs.htm>.