

# 전력반도체 다이접합용 Cu 입자의 PDA 통합 습식공정

조진현 쿨스 대표 [jhcho@cools.co.kr](mailto:jhcho@cools.co.kr)

## SUMMARY

전력반도체 다이접합에서 Ag 소결 접합재를 구리로 바꾸려면 구리 입자 표면에 소결을 돕는 나노 구리가 있어야 한다. PDA 층에 담지한 구리이온을 환원만 해서는 그 양이 단원자층에도 못 미친다. 담지 Cu를 시드로 삼아 본체와 연결된 나노 구리를 키우는 통합 습식공정과 단계별 판정 방법, 비교군 설계를 다룬다.

# Cu/PDA 통합 습식공정

산세 · PDA 형성 · 구리이온 담지 · 시드 환원 · 시드 성장 · 소결 접합

전력반도체 다이접합용 표면 나노 구리 형성 입자의 공정 설계안

Cu: copper · PDA: polydopamine(폴리도파민)



# 목차

01

## 개발 목표 및 공정 구성

적용 대상, 통합 흐름, 단면 구조, 문헌 근거, 핵심 설계 전환

02

## 산세 및 PDA 형성

산세 조건, 성막 속도, Cu 촉매 PDA 성장 경로

03

## 구리이온 담지

담지량 계산, pH 창, 판정 감도,  $^{65}\text{Cu}$  동위원소 추적

04

## 시드 환원 및 시드 성장

환원제 선정, 당량, 촉매면 국부화, 성장 설계

05

## 세척·보관 및 탐색 조건

분기 공정, 초기 탐색 매트릭스

06

## 검증·접합 평가·권리화

연결부 판정, 비교군, 접합 평가, 권리 연결, 기록·원가

# 개발 목표 및 적용 대상

1

## 목표 입자

산세 구리 본체 + 얇은 PDA 계면층 + 본체에 결합된 표면 나노 구리

2

## 적용 대상

전력반도체 다이접합용 구리 소결 페이스트

3

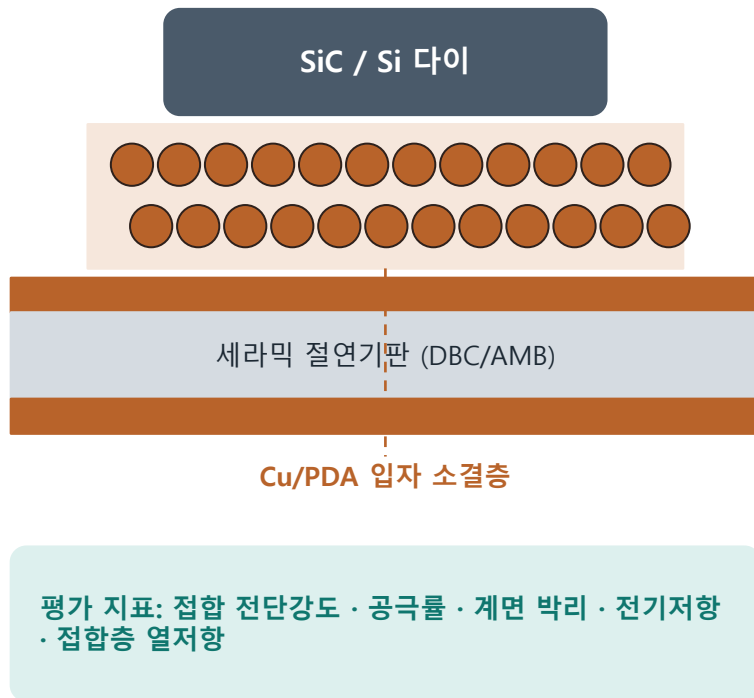
## 전환 대상

은(Ag) 소결 접합재의 구리 기반 대체

4

## 공정 성격

교반·세척·고액분리 중심 습식 공정, 광펄스 설비 불요



## 통합 공정 흐름 S10~S70



관리 핵심: 단계 간 표면 상태(산화 재성장·PDA 피복)와 액 조성(자유 Cu<sup>2+</sup>·잔류염) — 각 단계 분리 욕 운전, 이송 대기시간·세척 조건 기록

## 단계별 입자 단면 구조 변화



## 문헌 근거 매핑

### R1 산세 전처리

Chen 등 (2025) Coatings 15(2) 169 — 은 피복 구리 제조 시 NaOH 세정 후  $\text{H}_2\text{SO}_4$  산세

적용: 알칼리 세정과 산화막 제거의 역할 분리

### R2 PDA-구리 복합화

Liu 등 (2016) PLOS ONE 11(7) — PDA/산화그래핀에  $\text{CuSO}_4$ 로 Cu 나노입자 형성

적용: 담지·표면 핵생성 참고 (환원 계는 상이)

### R3 보로하이드라이드 환원

Glavee 등 (1994) Langmuir 10 — 수계·비수계  $\text{Cu}^{2+}$  보로하이드라이드 환원

적용: 보란계 환원 화학 일반 근거

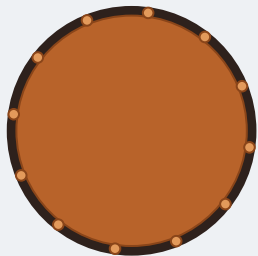
### R5 Cu 촉매 PDA 성장

Zhang 등 (2016) Angew. Chem. Int. Ed. 55 3054 —  $\text{CuSO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$  유도 고속 PDA 증착

적용: S20-S30 부분 통합 근거

## 핵심 설계 전환: 담지 환원에서 시드 성장으로

rev1 경로: 담지 → 환원



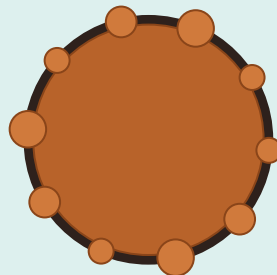
0.07 nm

1회 담지 Cu의 증가 두께  
단원자층(약 0.2 nm) 미만

- 결과 구조: 고립 나노 핵
- 판형 입자 기준 신생 Cu 0.19% (원료 대비)
- 소결 보조 나노 Cu 배합량 대비 2~3자릿수 부족



개정 경로: 담지 시드 → 시드 성장



13.3%

판형 입자 증가 5 nm 성장 시  
신생 Cu (원료 대비 질량비)

- 담지 Cu = 성장 시드
- $\text{Cu}^{2+}$  환원제 저과포화 연속 공급
- Cu 본체 측매면에서 본체 연결형 성장

## S10 산세 조건 및 세척 관리



### A 원료 기록

형상·입도·비표면적  
기존 유기 보호제 종류  
초기 산화 상태

### B 세척 종료 판정

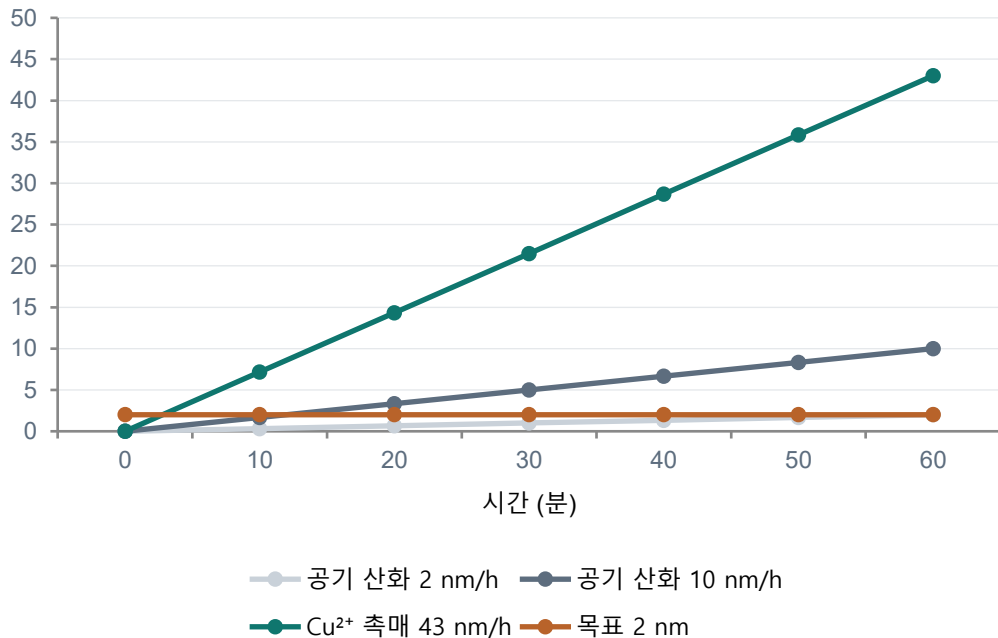
최종 세척액 pH·전도도  
황산염 잔류  
입자 회수율

### C 시료 보존

산세 직후 표면  
PDA 형성 후 표면  
→ 각각 분석용 분취

## PDA 성막 속도 및 목표 두께

성막 시간별 PDA 두께 (nm)



0.3~5 nm

rev1 조건(10~30분, 공기 산화) 두께 범위

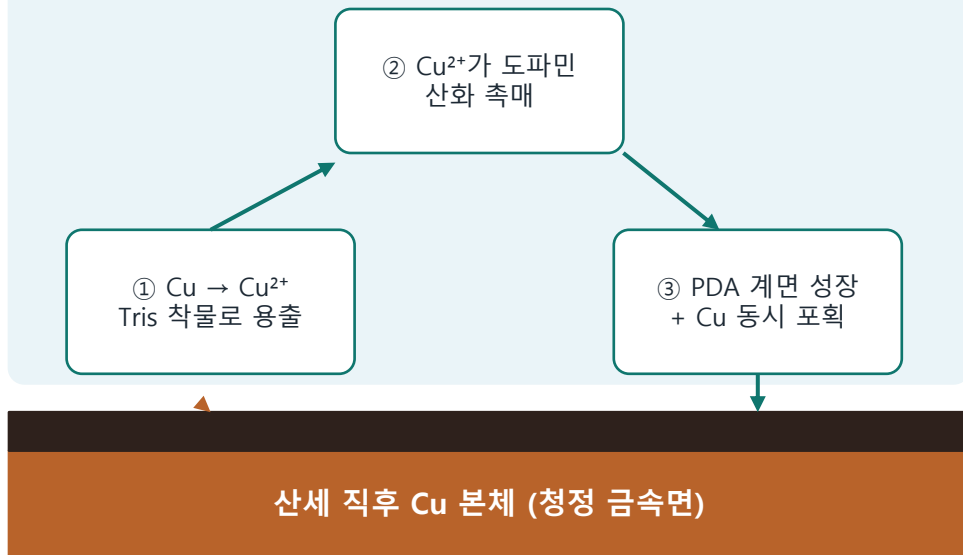
2.8분

Cu<sup>2+</sup> 축매 조건 2 nm 도달 시간

- 저농도(0.2~0.5 mg/mL)는 하한 쪽 속도
- 1 nm 이하 불연속 피복 영역 회피
- 두께·피복률·유기물 함량 실측 병행

## Cu 촉매 PDA 성장 경로 및 산소 의존 분리

Tris 완충액 (pH 8.5) + 도파민



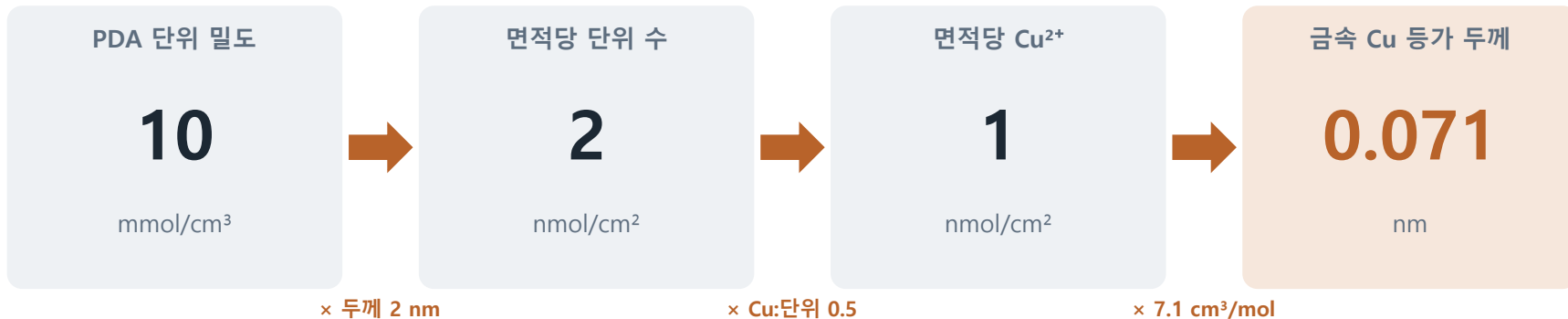
### 용존산소 구동 (rev1)

PDA 성장 = 산소 공급 의존  
산소 증가 → Cu 재산화 증가  
→ 두 요구가 상충

### 욕 내 Cu<sup>2+</sup> 구동 (개정)

산화 구동력을 Cu<sup>2+</sup>로 이전  
용존산소 저감 상태에서 PDA 성장 유지  
S20-S30 부분 통합 → 담지 단계 단축

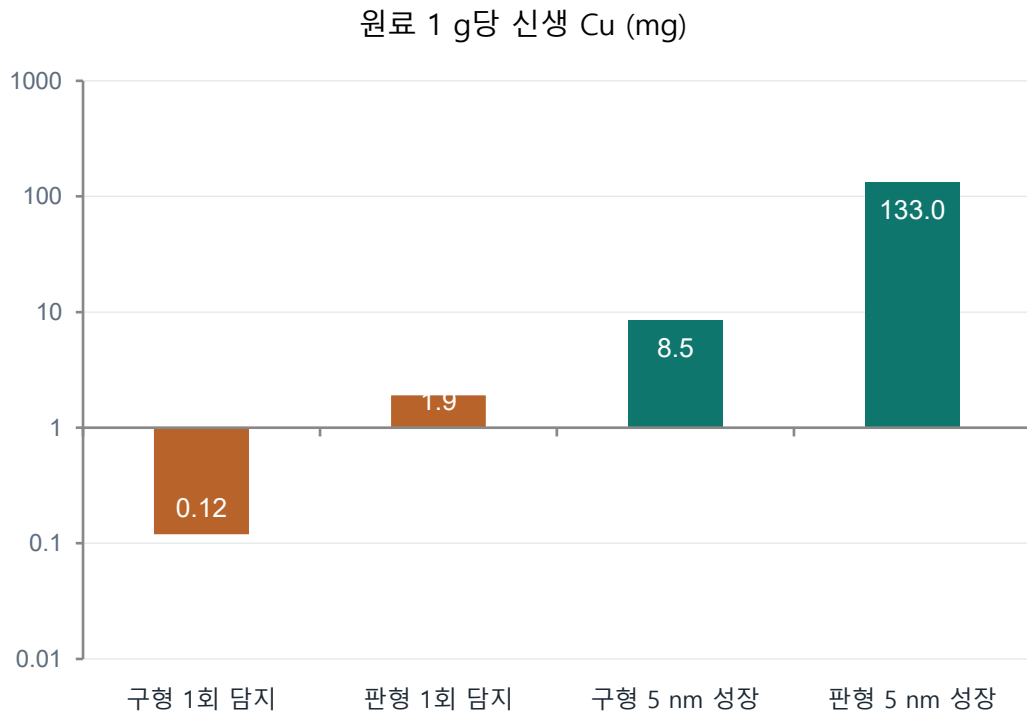
## 1회 담지 Cu량 계산 모델



### 등가 두께 비교 (nm)



## 입자 형상별 담지·성장 Cu량



### 1회 담지 한계

구형 120 ppm, 판형 0.19%

→ 담지만으로 소결 보조상 형성 불가

### 시드 성장 효과

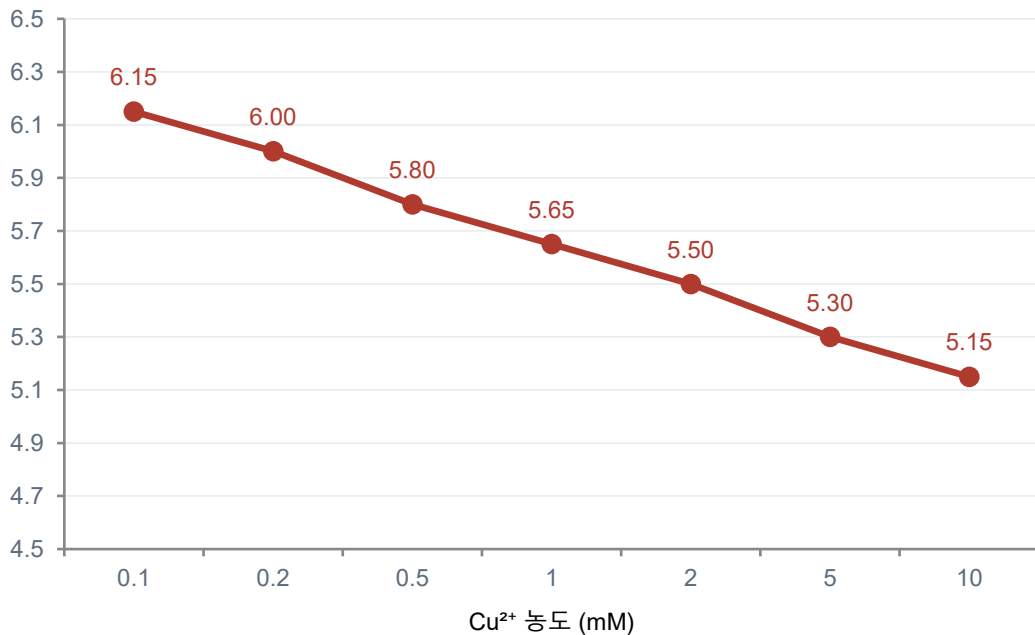
동일 입자에 등가 5 nm 성장 시

구형 70배, 판형 70배 증량

판형은 바이모달 배합 범위 진입

## $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 침전 개시 pH 창

$\text{Cu}^{2+}$  농도(mM)별 침전 개시 pH



rev1 제안

**여유 0.3**

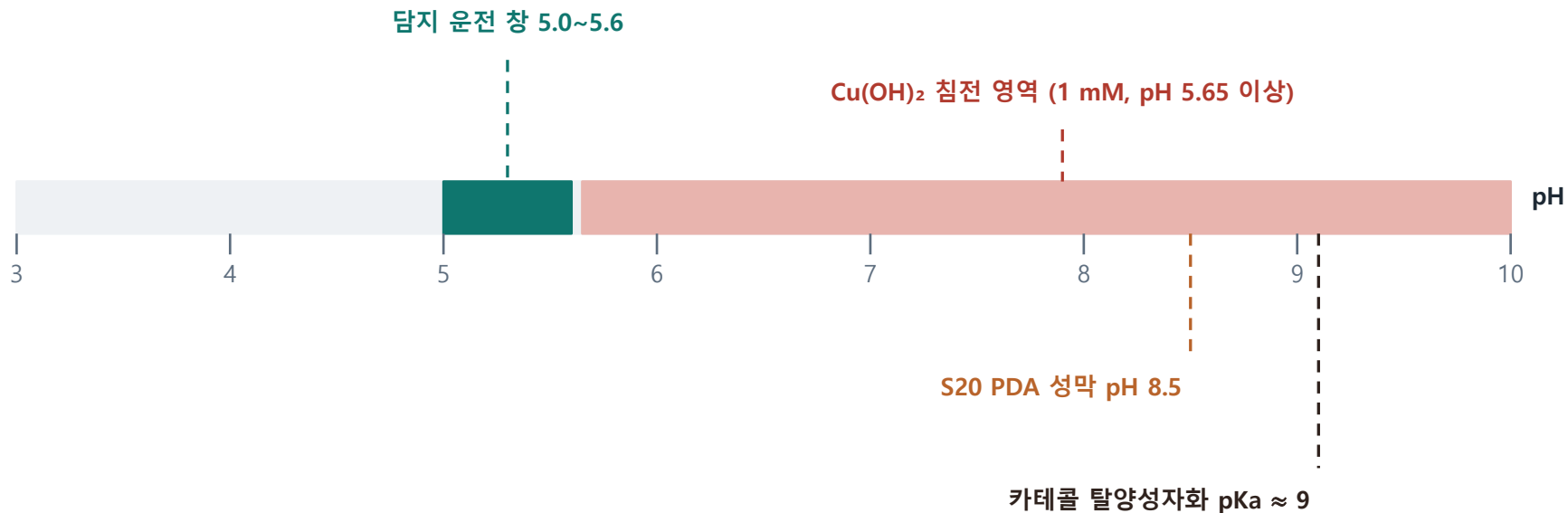
5 mM · pH 5.0 (경계 pH 5.30)  
입자 표면 선행 침전 위험

개정 기본 조건

**1 mM · pH 5.5**

경계 pH 5.65 · 아세테이트 완충  
사이트 당량 1~3배로 농도 설정

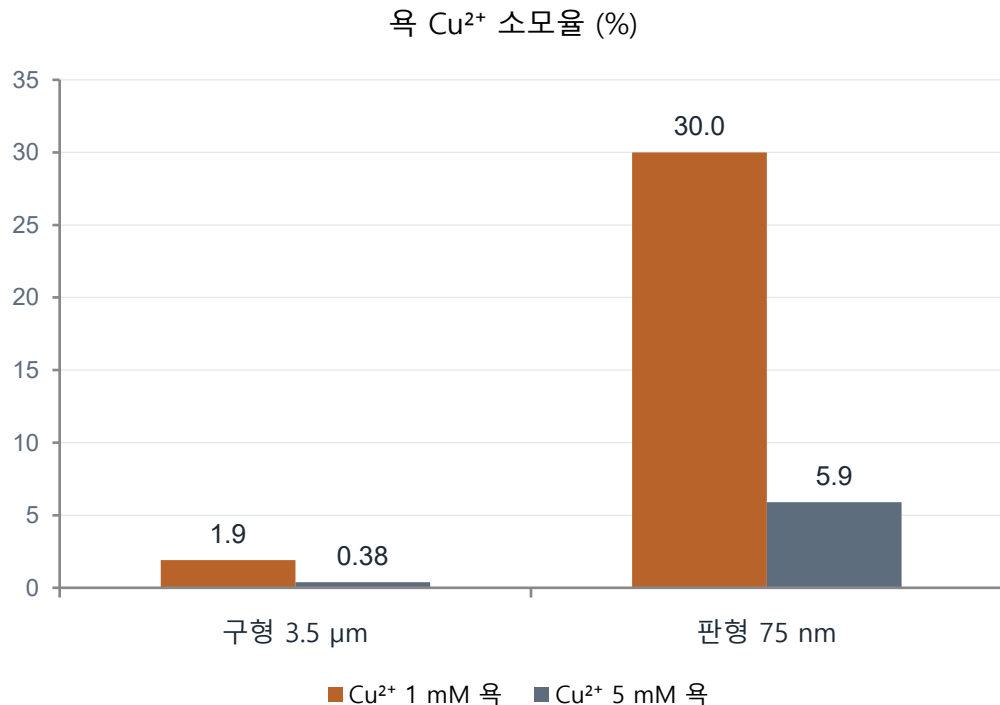
## PDA 관능기와 담지욕 운전 창



완충: 아세테이트 (약한 착화로 국부 pH 상승 흡수)

분리 욕 운전: PDA 형성액과 CuSO<sub>4</sub> 직접 혼합 배제

## 용액 소모량 기반 담지 판정 감도



### 구형 입자 판정 불능 영역

소모율 0.4~1.9%

본체 용출 공백 변동폭 내 신호

### 개정 조건

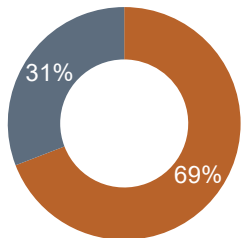
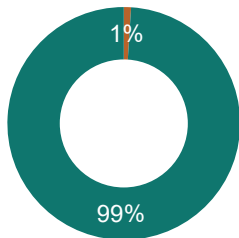
구형: 고형분 100 g/L, Cu<sup>2+</sup> 0.2~0.6 mM (사이트 1~3당량)

판형: 10 g/L · 1 mM 유지

→ 공백 보정 후 소모량 판정 성립

# $^{65}\text{Cu}$ 동위원소 추적 설계

천연 Cu (본체)

농축  $\text{CuSO}_4$  (담지)

$$\text{담지 Cu 분율 } x = (f_{\text{측정}} - f_{\text{천연}}) / (f_{\text{농축}} - f_{\text{천연}})$$

f. 전체 Cu 중  $^{65}\text{Cu}$  원자 분율 — 본체 용출과 무관하게 담지 Cu만 분리 정량

| 입자                   | $^{65}\text{Cu}/^{63}\text{Cu}$ 변화 | 분석                    |
|----------------------|------------------------------------|-----------------------|
| 구형 3.5 $\mu\text{m}$ | 0.39 ‰                             | MC-ICP-MS 또는 표면 선택 분석 |
| 판형 75 nm             | 6.0 ‰                              | 사중극자 ICP-MS           |

65

## 단면 동위원소 매핑

ToF-SIMS / NanoSIMS 단면에서  $^{65}\text{Cu}$  분포 직접 영상화  
 → 환원·성장 Cu의 본체 연결 여부 직접 판정  
 → 소결 후 접점의 담지 Cu 기여 추적  
 소요량 mg 단위

# 환원제 후보 비교

| 환원제               | 전자수 | Na 유입 | 잔류 원소  | 적용 단계     |
|-------------------|-----|-------|--------|-----------|
| NaBH <sub>4</sub> | 8   | 있음    | Na · B | 비교 기준군    |
| DMAB              | 6   | 없음    | B · 아민 | 시드 환원 주후보 |
| 암모니아보란            | 6   | 없음    | B      | 시드 환원 대안  |
| 글리옥실산 + TMAH      | 2   | 없음    | 유기산 잔류 | 시드 성장     |

Na

Na<sup>+</sup>: 전력반도체 가동이온 오염원 →  
접합재 유입 차단

B

B 잔류: 세척 후 원소 분석으로 확인

e<sup>-</sup>

보란계: 본체 측매면 산화 → 계면 환  
원 국부화

## 환원제 당량 및 수소 발생량

### 1 이론 당량

$\text{BH}_4^-$  1몰 =  $8\text{ e}^-$  =  $\text{Cu}^{2+}$  4몰 환원

담지 Cu 29.7 mmol/kg  $\rightarrow$   $\text{BH}_4^-$  7.4 mmol/kg

### 2 투입 설계

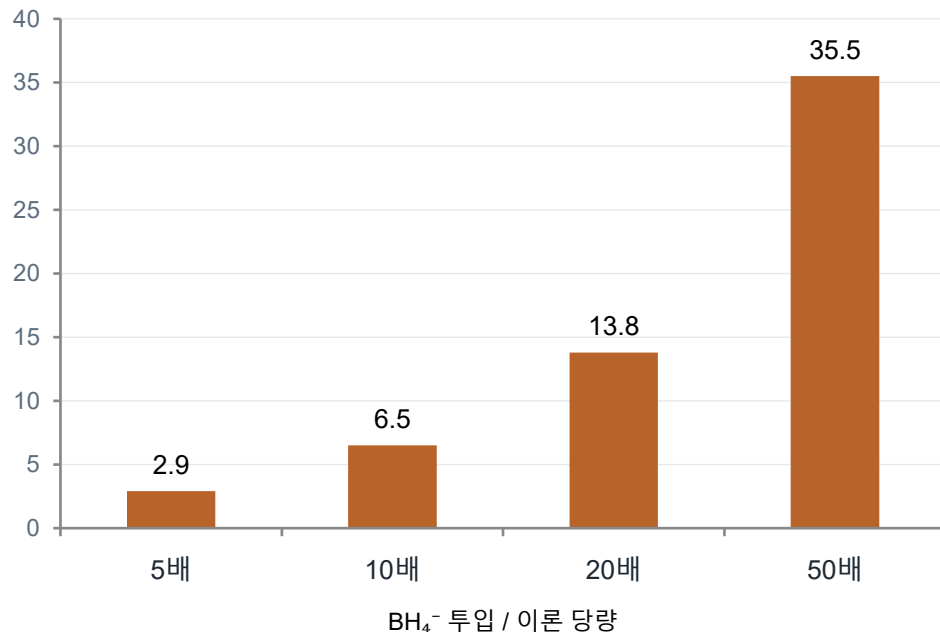
Cu 본체 =  $\text{BH}_4^-$  가수분해 촉매

실투입 = 이론치의 수~수십 배

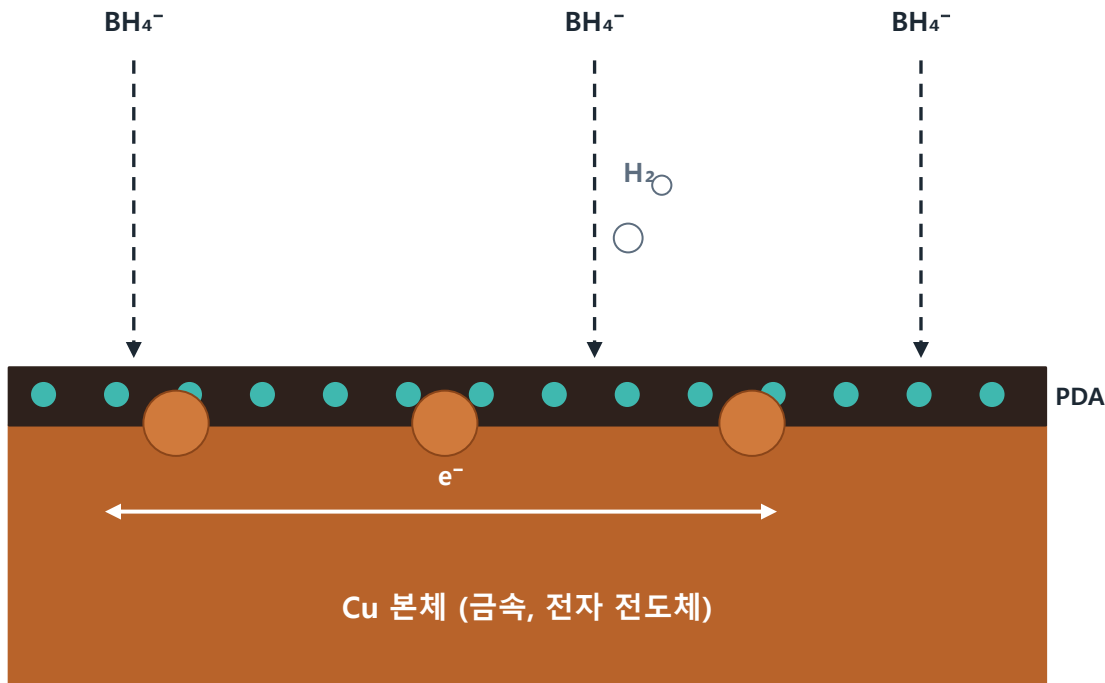
투입 속도 상한 = 수소 배출 능력

개방계 산 비접촉 운전

과잉 배수별 수소 발생량 (L / kg 판형 입자)



## Cu 본체 촉매면 환원 국부화



1

### BH<sub>4</sub><sup>-</sup> 산화

Cu 본체 금속면이 촉매 — 전자를 본체로 주입

2

### Cu<sup>2+</sup> 환원

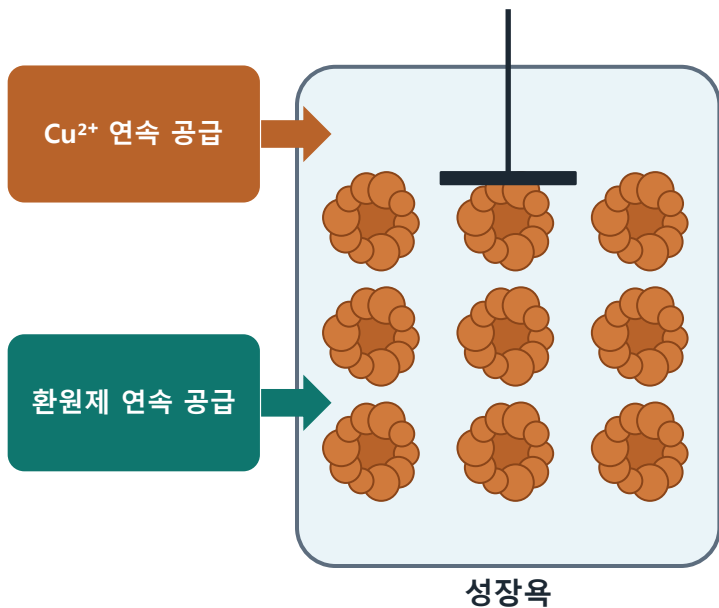
본체-PDA 계면에서 우선 진행 — 전자 공급점과 인접

3

### 결과 구조

본체에서 PDA를 관통해 자라는 본체 연결형 나노 구리

## 시드 성장 공정 설계



### 공급 속도

시드 표면적 기준 설정 · 표면적 증가에 따라 증속

### 모니터링

욕 탁도(자유 입자) · 용존 Cu · 수소 발생

### 종료 기준

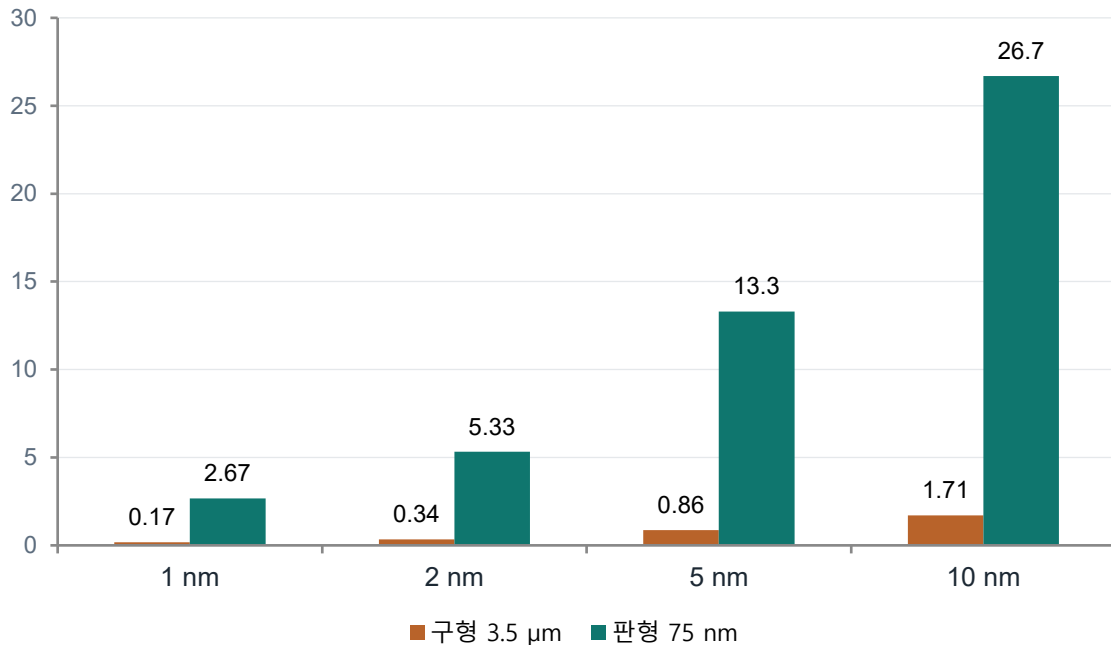
목표 등가 성장 두께 (Cu 투입 적산)

### 욕 조성

Na-free 환원제 · TMAH pH 조절 · 착화제

## 시드 성장 두께별 신생 Cu 질량비

등가 성장 두께별 신생 Cu (원료 대비 %)



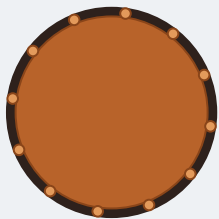
### 판형 입자

5~10 nm 성장으로  
신생 Cu 13~27%  
→ 단일 입자 내 바이모달 구조

### 구형 입자

10 nm 성장 1.7%  
→ 네킹 개시점 공급 용도  
→ 판형과 혼합 배합 설계

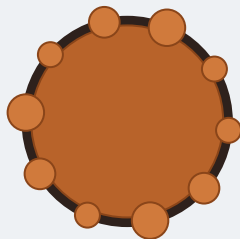
## 환원 Cu 구조 분류 및 소결 기능



고립 나노 핵

PDA 표면·내부에 분산된 수 nm 핵

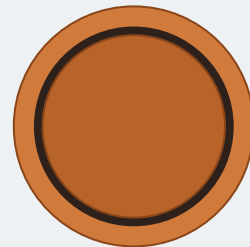
저온 네킹 개시점



부분 연결 구조

본체와 연결된 돌기 + 고립 핵 혼재

네킹 + 본체 전도 경로

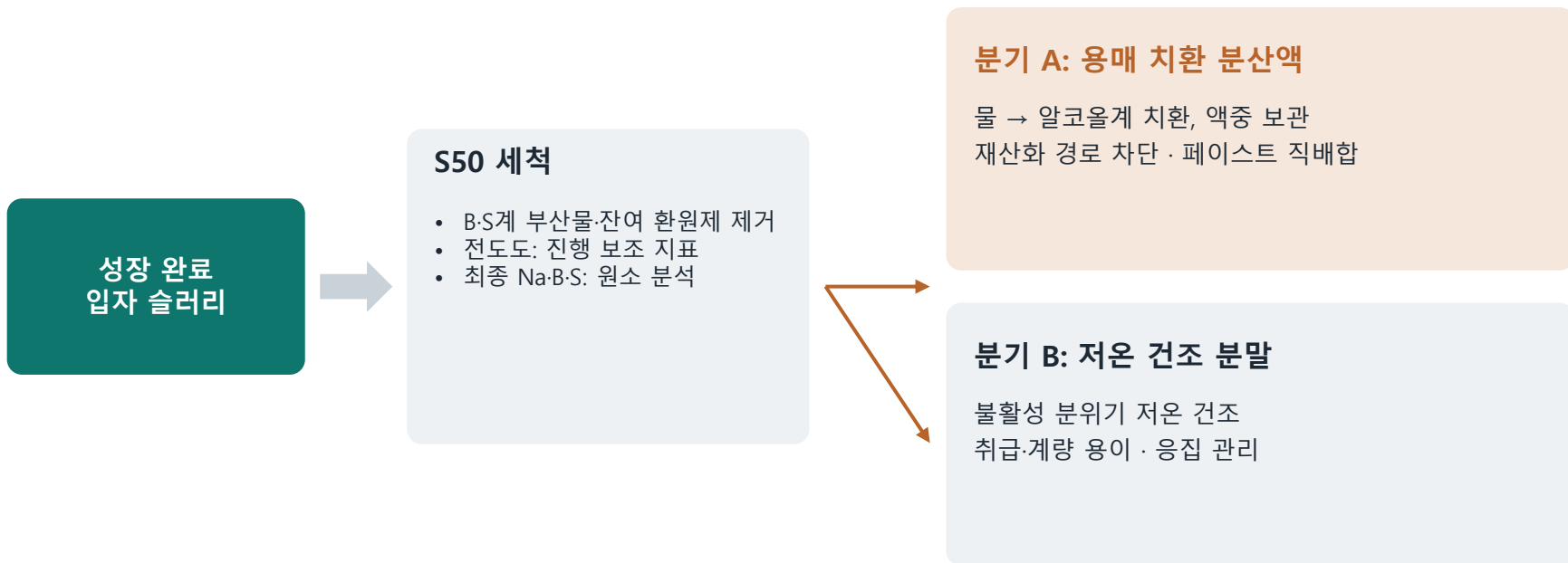


연속 피막

외표면에서 서로 연결된 구리층

도전 경로 + 산화 억제 외피

## S50 세척·용매 치환 및 S60 보관 분기



공통 판정: 응집 · 재산화 · 페이스트 배합 적합성 → 동일 로트 양 분기 비교

## 초기 탐색 조건 매트릭스

| 단계         | 비교 수준                                                           | 판정 항목                               |
|------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| S20 PDA 형성 | 도파민 0.2 / 0.5 mg/mL × 10 / 30분, pH 8.5 · Cu <sup>2+</sup> 촉매 유무 | 피복률, 두께, 산화 증가                      |
| S30 Cu 담지  | CuSO <sub>4</sub> 사이트 1 / 3당량, pH 5.0 / 5.5, 아세테이트 완충           | 욕 침전, 담지량( <sup>65</sup> Cu), 본체 용출 |
| S40 시드 환원  | DMAB / 암모니아보란 / NaBH <sub>4</sub> (기준), 과잉 5 / 10배              | Cu 화학상태, 자유 입자, 잔류 B·Na             |
| S45 시드 성장  | 등가 2 / 5 / 10 nm, 공급 속도 2수준                                     | 연결 구조, 자유 입자, 성장 균일도                |
| S50-S60 회수 | 분산액 유지 / 저온 건조 분기                                               | 회수율, 응집, 산화, 배합성                    |

## 공정 연결부 판정 체계

1

### 산세 효과 유지

시료

원료 → 산세 직후 → PDA 후

판정

표면 화학상태 · 단면 산화층 두께 · 산세 손실량

2

### 신생 금속 Cu 형성

시료

담지 전후 · 환원 전후 · 비구리 지지체 보조시료

판정

Cu 2p + Cu LMM · TEM/회절 ·  $^{65}\text{Cu}$  정량

3

### 본체·이웃 입자 연결

시료

환원·성장 후 입자 · 소결 접합부

판정

단면 TEM/STEM ·  $^{65}\text{Cu}$  단면 매핑 · 접점 C-O 분포

# 비교군 설계 A~G

| 군 | 산세 | PDA | Cu 담지 | 시드 환원 | 시드 성장 | 확인할 기여        |
|---|----|-----|-------|-------|-------|---------------|
| A | —  | —   | —     | —     | —     | 원료 기준 성능      |
| B | ●  | —   | —     | —     | —     | 산세 자체 효과      |
| C | ●  | ●   | —     | ●     | —     | 환원제의 본체 처리 효과 |
| D | ●  | ●   | ●     | —     | —     | 외부 환원 추가 기여   |
| E | ●  | ●   | ●     | ●     | —     | 담지·환원 결합 효과   |
| F | —  | ●   | ●     | ●     | —     | 사전 산화막 제거 기여  |
| G | ●  | ●   | ●     | ●     | ●     | 시드 성장 기여      |

## 전력반도체 접합 평가 체계



## 권리 연결 구조: P0·P5 및 신규 차별축

### P0 rev4

청구항 1: 금속 구리 도전부 + 잔존 보호층

청구항 12·14: 카테콜계층 형성·담지·화학 환원

→ 제조 경로의 구체 실시형태

### Cu/PDA 통합 습식공정

### P5 rev3

판형 구리 + 접점 연결입자  
화학환원 허용

→ 기본 경로는 연결입자 불요, 판형 성장  
형으로 확장

효과 입증 연결: 산세 → 산화물 환원 부담 감소 →  
PDA 손상 감소 → 소결 접합 성능

### 신규 차별축 후보

- ① 담지 시드 + 저과포화 시드 성장 공정
- ② 욕 내  $\text{Cu}^{2+}$  측매 PDA 성장·동시 포획 단일욕
- ③ 본체 측매면 국부 환원에 의한 본체 연결형 나노 구리 구조
- ④ Na-free 보란계 시드 환원

## 배치 기록 체계 및 원가 산정 구조

1

### 원료·전처리

로트, 형상·크기, 보호제, 산화 상태, 산세 조건, Cu 손실량

2

### 반응·이송

욕 조성·pH·온도·시간, 산소 조건, 이송 대기, 세척·분리 방식

3

### 물질수지

투입 Cu염, 상등액·세척액 Cu,  $^{65}\text{Cu}$  분율, 회수율, 자유 입자

4

### 입자·접합

PDA 두께, Cu 화학상태·연결 구조, 잔류염, 소결 조건·결과

구리 원료

도파민

환원제

세척수·폐액

처리 시간

분말 손실

kg당 원가

비교 기준:  
은 피복 구리

# 근거 문헌 및 내부 참조

R1

Chen 등 (2025). Mechanism of Free Silver Formation While Preparing Silver-Coated Copper Powder by Chemical Plating and Its Control. Coatings 15(2), 169.

R2

Liu 등 (2016). In situ Immobilization of Copper Nanoparticles on Polydopamine Coated Graphene Oxide for  $H_2O_2$  Determination. PLOS ONE 11(7), e0157926.

R3

Glavee 등 (1994). Borohydride Reduction of Nickel and Copper Ions in Aqueous and Nonaqueous Media. Langmuir 10, 4726–4730.

R4

Zhao 등 (2018). Preparation and electrical properties of sintered copper powder compacts modified by polydopamine-derived carbon nanofilms. J. Mater. Sci. 53, 6562–6573.

R5

Zhang 등 (2016).  $CuSO_4/H_2O_2$ -Induced Rapid Deposition of Polydopamine Coatings with High Uniformity and Enhanced Stability. Angew. Chem. Int. Ed. 55(9), 3054–3057.

R6

J. Mater. Chem. B 저자원고, DOI 10.1039/C8TB02310G — PDA 성막 속도(공기 산화- $CuSO_4/H_2O_2$ ) 인용 범위.

I

내부: P0 rev4 (카테콜계 보호층 구리 도전부 복합입자) · P5 rev3 (판형 구리·접점 연결입자) · Cools\_PDA\_Cu\_Development\_Plan\_rev4



**주식회사 쿨스**

**대표이사 조진현**

본사 | 경상남도 창원시 의창구 중동북로 23

지사 | 경기도 화성시 동탄구 삼성1로 160

M. 010-2280-9414

E. [jhcho@cools.co.kr](mailto:jhcho@cools.co.kr)

H. [www.cools.co.kr](http://www.cools.co.kr)

---