

입자·핵·우주 물리 실험을 위한 IBS Silicon Sensor R&D Foundry 구축 제안 보고서

1. Executive Summary

입자·핵·우주 물리 실험에서는 실험 조건에 맞춘 **고성능 실리콘 검출기(입자 및 광센서)**가 지속적으로 요구되어 왔다. 그러나 국내에는 연구자가 센서를 설계-제작-측정-피드백까지 직접 연결하며 반복적으로 최적화할 수 있는 전문 연구형 실리콘 센서 인프라(Foundry)가 존재하지 않는다. 현재 국내 실리콘 검출기 제작은 연구자가 개별적으로 설계를 수행한 뒤, 한국전자통신연구원(ETRI)과 같은 준상업형 반도체 라인을 활용하는 방식에 의존하고 있다.

이러한 준상업형 반도체 라인은 본질적으로 **CMOS-MEMS 양산을 목표로 한 표준화된 공정 체계**에 기반하고 있어, 연구 목적의 실험적 공정 수행에는 구조적 한계를 가진다. 공정 조건(열처리 온도, 식각 깊이, 플라즈마 파워, 증착 조건 등)은 safety rule과 고정된 recipe에 의해 제한되며, 센서 성능에 직접적인 영향을 미치는 변수들을 연구자가 실험적으로 조정하거나 반복 최적화하는 것이 사실상 불가능하다. 또한 양면 패터닝, 비표준 두께 웨이퍼 공정, 3D 구조 공정 등은 장비 및 운영 제약으로 인해 수행이 제한된다.

운영 구조 측면에서도 한계는 명확하다. 공정은 엔지니어 위탁 방식으로 진행되어 연구자가 run 중 발생한 공정 이슈를 실시간으로 파악하거나 즉각적으로 수정·반영하기 어렵다. 소규모 lot(1~2 wafer) 제작에도 높은 비용과 6~12 주 이상의 대기 시간이 요구되어, 빠른 제작-측정-피드백을 통한 반복 연구를 원활히 할 수 없다. 더불어 동일 라인을 여러 프로젝트가 공유함에 따라 교차 오염 위험이 존재하며, 서로 다른 센서 구조와 공정 레시피가 혼재된 상태에서 발생하는 공정 환경의 미세한 변동만으로도 센서 누설 전류 특성이 불안정해져 run-to-run 재현성 확보에 어려움이 발생한다. 이로 인해 공정 변수와 센서 특성 간의 상관관계를 체계적으로 검증하기 어렵고, 연구자 주도의 완전한 R&D 루프 형성이 제한된다.

이에 본 제안서는 **IBS Silicon Sensor R&D Foundry** 구축을 통해 이러한 구조적 한계를 근본적으로 해소하고자 한다. 본 시설은 단순한 센서 제작 라인이 아니라, **입자·핵·우주 물리 실험에 사용되는 고성능 실리콘 검출기(입자 및 광센서)** 개발 전 과정을 하나의 연구 루프(설계-제작-측정-피드백)로 통합하는 연구자 중심의 개방형 공정 인프라(Open Process Environment)를 목표로 한다. 연구자는 공정의 각 단계를 연구소와 협력하여 직접 설계·조정·기록하며, 센서 성능에 영향을 미치는 공정 파라미터를 자유롭게 탐색할 수 있다.

요약하자면,

- **기존 준 상업형 반도체 라인(ETRI) → 범용 반도체 개발을 위한 “표준화 중심의 닫힌 공정 체계”**

- **IBS Silicon Sensor R&D Foundry** → 입자·핵·우주 물리 실험을 위한 고성능 실리콘 검출기(입자 및 광센서) R&D에 특화된 “탐구 중심의 열린 공정 환경”

으로 구조와 목적이 근본적인 차이를 가진다.

이러한 연구형 파운더리 모델은 이미 유럽의 CNM(스페인)과 FBK(이탈리아)에서 CERN 실험용 실리콘 센서를 개발·제작·공급해 온 사례를 통해 그 구조와 효용성이 입증되었다. IBS Silicon Sensor R&D Foundry는 이러한 운영 철학을 한국의 입자·핵·우주 물리 기초과학 환경에 적용하고자 한다.

2. 국내외 인프라 현황 분석

IBS Silicon Sensor R&D Foundry의 구축 필요성을 명확히 이해하기 위해서는, 먼저 **국내 반도체 연구 인프라가 어떤 구조로 운영되고 있는지**, 그리고 **해외의 CNM(스페인)·FBK(이탈리아)와 같은 주요 연구형 팝이 어떤 역할을 수행하고 있는지를 비교할 필요가 있다**. 본 장에서는 국내의 산업형·교육형 반도체 연구 인프라와 해외의 CNM·FBK 연구형 팝을 비교 분석함으로써, IBS Silicon Sensor R&D Foundry가 지향해야 할 **기술적·운영적 방향성을 구체적으로 도출한다**.

2.1 국내 연구용 반도체 인프라 현황

| 구분 | ETRI | ISRC (서울대) | NNFC (KAIST) |
|------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------|
| 기관 성격 | 산업형·공공형 | 범용 연구·교육형 R&D 팝 | 범용 공동활용형 |
| 공정 목표 및 주 결과물 | 표준 CMOS · MEMS 소자 · Si 소자 | CMOS · MEMS 실험용 소자 제작 | 다양한 연구자 대상 공정 지원 |
| 공정 유연성 | 낮음 (표준 recipe 고정) | 중간 | 중간 |
| 고저항 웨이퍼 공정 | 가능 (최적화 어려움) | 제한적 | 제한적 |
| 두꺼운/얇은 기판 | 불가 | 불가 | 불가 |
| Wafer 양면공정 | 어려움 | 어려움 | 어려움 |
| 공정 접근성 | 위탁형 | 위탁 또는 직접 수행 | 위탁 또는 직접 수행 |
| 재현성 | 높음(양산형) | 낮음 (오염도 높음) | 낮음 (오염도 높음) |
| 핵심 한계 | 공정 변수 조정 불가 | 표준화 미흡 재현성 낮음 | 표준화 미흡 재현성 낮음 |

국내 반도체 인프라는 크게 산업형 팝(ETRI 등)과 대학 기반 팝(ISRC, NNFC 등)으로 구분된다. 앞서 언급한 바와 같이, 산업형 팝은 공정 신뢰도와 품질 안정성은 높지만, 표준화된 recipe

기반의 고정형 체계로 운영되어 연구자가 변수 조정이나 실험적 시도를 수행하기 어렵다. 반대로 대학 중심 팝은 장비 접근성은 우수하나, 공정 표준화 및 재현성 측면에서 일관성이 부족하다.

결과적으로 공정 신뢰성과 연구 유연성을 모두 갖춘 연구형 팝은 국내에 부재한 상황이며, 이로 인해 국내 입자물리 센서 공급은 여전히 해외(FBK, Micron 등)에 의존하고 있다. 그러나 해외 제작 구매의 경우 연구자가 원하는 설계를 직접 반영하기 어렵고, 공정 recipe 및 wafer 특성 데이터의 비공유로 인해 공정-성능 상관관계 분석과 반복 최적화가 제한된다. 결국 국내 연구자는 실험 요구에 완전히 최적화되지 않은 센서를 사용할 수밖에 없으며, 국내 실리콘 센서 R&D 역량이 구조적으로 해외 인프라에 종속된 상태다.

2.2 해외 연구형 반도체 인프라 현황

유럽의 대표적 연구형 반도체 팝인 FBK(이탈리아)와 IMB-CNM(스페인)은 CERN 의 ATLAS, CMS 실험과 INFN 의 DarkSide 등 대형 입자물리 프로젝트를 지원하며, 연구 개발(R&D)과 대형 실험용 센서 제작을 병행하는 **공동개발형 연구 인프라(Collaborative R&D Foundry)**를 운영하고 있다. 이들은 연구자가 요구하는 센서를 자체적으로 설계·제작·검증하여 실험에 공급함으로써, 유럽 입자물리 실험의 안정적인 센서 개발·공급 체계를 뒷받침하고 있다.

FBK 와 CNM 은 공공 연구 기반의 비영리 인프라로, CERN-INFN 등 협약 기관과의 공동 연구 체계를 기반으로, 시뮬레이션 및 공정 설계, 웨이퍼 사양, 이온 주입 조건 등 핵심 공정 파라미터를 연구자와 공동으로 협의·조정할 수 있는 구조를 갖추고 있다. 또한 다양한 마이크로·나노 소자 연구가 공존하는 조직 내에서 실리콘 센서 전용 공정 구역을 물리적으로 분리·운용함으로써, 입자물리 실험에 요구되는 방사선 내구도와 높은 공정 재현성을 안정적으로 확보하고 있다. 이러한 운영 체계를 통해 FBK 와 CNM 은 연구자가 설계-공정-피드백 루프를 완결할 수 있는 유럽형 공동개발 R&D 센서 제작 모델로 자리매김하고 있다.

2.2.1 FBK (Fondazione Bruno Kessler, Italy)

- 조직/라인 구조: FBK 내 Center for Sensors & Devices(S&D) 산하 **CRS(Custom Radiation Sensors)** 팀이 센서를 전담. MEMS-CMOS 등과 물리적으로 분리된 **sensor** 전용 **cleanroom zone** 을 사용.
- 플랫폼·공정:
 - **LGAD**: p-type **epitaxial** on p++ (대략 25–100 μm epi). 타이밍 층(ETL -gain layer) 대면적 공정.
 - **PAD/Strip**: p-type FZ 고저항(수 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$), 양면 패터닝(double-sided).
 - **3D sensor**: p-type FZ, 양면 DRIE/트렌치 전극, 방사선 내구성 목적.
 - **SiPM**: 주로 **n-epi** 플랫폼으로 cryogenic 응용(DarkSide 등).
- 두께 운용: LGAD 활성층 수십 μm , PIN/3D 는 **200–320 μm** 중심.

- **운영 철학:** 오픈 프로세스(연구자 공동 설계), **zone** 분리로 오염 관리. DarkSide SiPM, CMS-LGAD 등 대형 국제 프로젝트를 장기간·안정적으로 수행.

2.2.2 IMB-CNM (CSIC, Spain)

- **조직/라인 구조:** 스페인 국립연구위원회(CSIC) 산하 **IMB-CNM** 이 운영. **Radiation Detectors/Silicon Sensors** 그룹이 센서를 전담하며, **6in**(센서 주력) 라인을 타 연구 공정과 분리 운영.
- **플랫폼·공정:**
 - **LGAD:** p-type epitaxial on p++ (대략 ~25–100 μm epi).
 - **PAD/Strip:** p-type FZ 고저항, 양면 패터닝(double-sided).
 - **3D sensor:** p-type FZ, 양면 DRIE/트렌치 전극.
- **두께 운용:** LGAD 활성층 수십 μm , PIN/3D **200–320 μm** 중심.
- **운영 철학:** 오픈 프로세스·공정 피드백 루프, **zone** 분리 오염 관리. ATLAS/CMS LGAD-3D 등 CERN 업그레이드 프로그램의 핵심 R&D 파트너.

| 구분 | FBK (Italy) | IMB-CNM (Spain) |
|----------------------------------|---|---|
| 기관 성격 | 비영리 연구재단형(이탈리아 트렌토) | 공공 연구소형(스페인 바르셀로나) |
| 협력 기관 | CERN, INFN | CERN, ESA |
| 조직 내 센서 담당 | S&D 센터 내 CRS 팀(설계·피드백) | Radiation Detectors 그룹(설계·피드백) |
| 클린룸 운영 | 센서 전용 zone (MEMS/CMOS 와 분리), 교차 오염 관리 | 센서 전용 zone 6 inch 라인 교차 오염 관리 |
| 주요 플랫폼 | LGAD(epi) / PAD-Strip(FZ) / 3D(FZ) / SiPM(n-epi) | LGAD(epi) / PAD-Strip(FZ) / 3D(FZ) |
| 공정 구조 | 단면 및 양면 공정 가능 | 동일 |
| 두께 운용(주류) | LGAD 활성층 수십 μm / PIN-3D 200–320 μm | 동일 |
| 수십 μm 및 1 mm 이상 센서 | 제작 못함 | 제작 못함 |
| 운영 철학 | 오픈 프로세스, zone 분리 | 동일 |
| 대표 실적 | DarkSide SiPM, CMS-ETL LGAD , ATLAS/LHCb 3D | ATLAS/CMS LGAD-3D , ESA 방사선 모니터 |

▶ FBK(CRS) https://sd.fbk.eu/en/research/research-units/crs/?utm_source=chatgpt.com

▶ IMB-CNM (Spain) <https://www.imb-cnm.csic.es/en/research/research-groups/radiation-detectors-group-rdg>

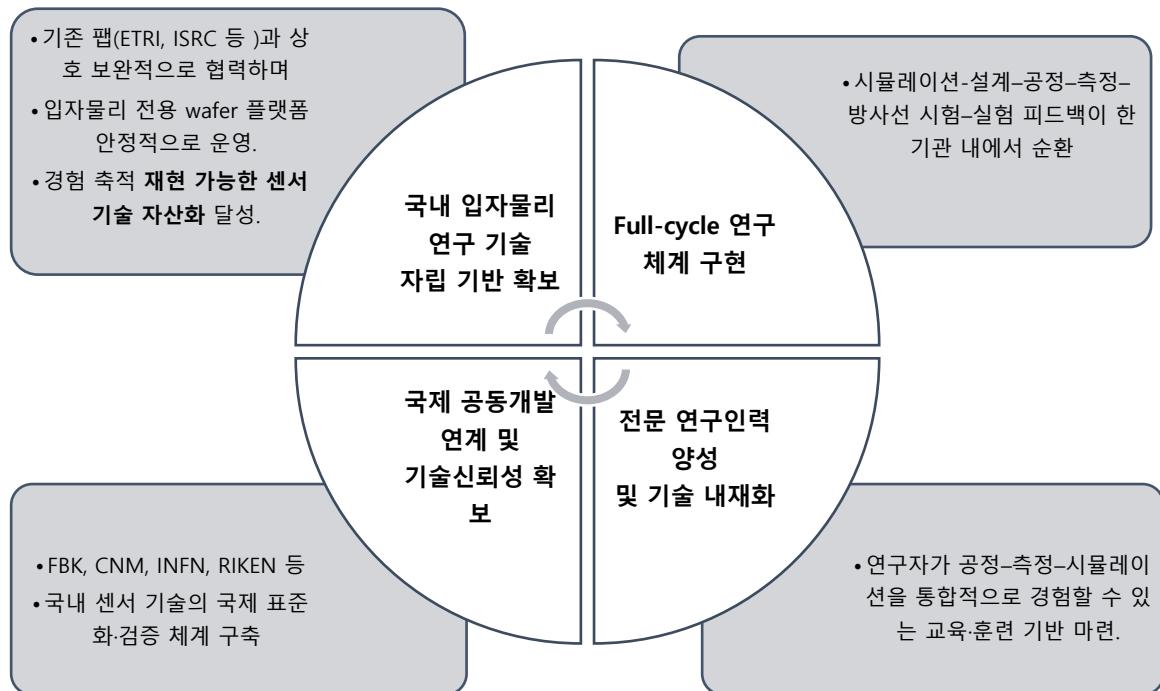
3. IBS Silicon Sensor R&D Foundry: 연구형 센서 파운더리 모델

앞 장에서 분석한 유럽의 연구형 센서 파운더리(CNM, FBK) 모델을 바탕으로, **IBS Silicon Sensor R&D Foundry**는 입자·핵·우주 물리 실험용 실리콘 센서 개발을 전담하는 한국형 연구형 센서 파운더리 모델을 제안한다. 국내에서도 최근 입자 핵 우주 물리 실험용 실리콘 센서의 자체 개발을 위한 다양한 시도가 많이 이루어지고 있으나, 이러한 시도들은 대부분 범용 또는 교육 중심의 기존 반도체 인프라를 활용한 개별적 접근에 머물러 있으며, 실험 요구에 최적화된 센서를 지속적으로 설계–제작–검증할 수 있는 연구형 공정 인프라로까지 확장되지는 못하고 있다.

입자·핵·우주 물리 실험에서 요구되는 실리콘 센서는 실험 조건에 따라 구조·두께·전기적 특성이 크게 달라지며, 이에 따라 공정 변수의 반복적 조정과 실험적 검증이 필수적이다. IBS Silicon Sensor R&D Foundry는 기존의 산업형·교육형 팝을 대체하려는 것이 아니라, 이들이 구조적으로 충족하기 어려운 실험 전용 요구를 보완·확장하는 연구형 인프라로서, **연구자 주도의 공정 설계와 설계–제작–측정–피드백이 하나의 연구 루프로 연결되는 구조를 핵심 개념으로 한다.**

| 구분 | 기존 국내 팝 (ETRI, ISRC, NNFC 등) | IBS Foundry |
|--------|---------------------------------|---|
| 목적 | 범용 소자·MEMS 연구, 교육·산업 중심 | 입자·핵·우주 물리 실험 전용 센서 R&D |
| 연구 체계 | 공정 중심 운영 (시뮬레이션·설계는 연구자가 개별 수행) | 설계–시뮬레이션–공정–측정–실험 피드백이 통합된 Full-cycle 연구 구조 |
| 공정 제어 | 고정 recipe, safety rule 제한 | 자유로운 parameter 조정 |
| Lot 크기 | ≤ 25 wafer 기준 대량 batch | 1–2 wafer 단위 실험적 run 가능 |
| 플랫폼 | 단면공정/ ~400 μm – 800 μm | 양면공정, 3D 구조/ 20 μm – 2 mm |
| 공정 수정 | 엔지니어 중심, 즉각적 수정 불가 | 연구자 직접 수정 및 피드백 반영 |
| 오염 관리 | 다중 프로젝트 라인 공유 → 교차 오염 가능 | 전용 공정 라인 및 고저항 전용 장비 관리 |
| 데이터 공유 | 비공개 공정 flow / recipe 비공유 | 공정 로그 및 특성 데이터 공유 가능 |
| 재현성 | Run to run 변동성 존재 | 재현성 우선 관리 |
| 피드백 속도 | 6–12 주 단위 주기 | 1–2 주 단위 주기 |
| 결과물 | 표준 소자 / 칩 | 실험용 센서 / 논문 / 공정 데이터 |

4. IBS Foundry 의 역할 및 파급효과



1. 국내 입자물리 연구의 기술 자립 기반 확보

- ETRI, ISRC 등 기존 팹과 상호 보완적으로 협력하며
입자물리 전용 wafer 플랫폼(고저항 FZ, 두꺼운 기판, 양면 공정 등)을 안정적으로 운영.
- 공정 recipe-측정 데이터·성능 결과를 축적해, 재현 가능한 센서 기술 자산화 달성.

2. Full-cycle 연구 체계 구현

- 시뮬레이션-설계-공정-측정-방사선 시험-실험 피드백이 한 기관 내에서 순환되는 **Full-cycle R&D 인프라** 실현.

3. 전문 연구인력 양성 및 기술 내재화

- 연구자가 공정-측정-시뮬레이션을 통합적으로 경험할 수 있는 교육·훈련 기반 마련.

4. 국제 공동개발 연계 및 기술 신뢰성 확보

- FBK, CNM, INFN, RIKEN 등과의 공동연구로 국내 센서 기술의 국제 표준화·검증 체계 구축.