

2025학년도 동계 이화글로벌프론티어 최종보고서

미국 반도체 클러스터의
에너지 및 물 자원 효율화 모델 탐사를
통한 한국 반도체 산업의 지속 가능
운영 전략 제안

E-Cube

(Ewha Energy Environment)

2025

목 차

I. 서론	5
i. 연구 주제	5
ii. 논의 배경	5
iii. 논의의 필요성	6
iv. 연구 방법	8
II. 본론	9
a. 반도체 클러스터의 전력 수자원 효율화 전략 관련 기존 문헌 연구	9
i. 기존 논의 요약 및 정리	9
ii. 기존 연구의 한계점	10
iii. 연구를 통해서 한계를 극복할 수 있는 점	12
b. 연구 방법 제시	14
i. 현지조사 및 전문가 인터뷰의 필요성	14
ii. 현지조사 및 전문가 인터뷰를 통해서 얻을 수 있는 기대효과	15
c. 탐사 내용	16
i. 국내 탐사	16
ii. 국내 전문가 인터뷰	17
iii. 해외 탐사	20
iv. 해외 전문가 인터뷰	35
d. 본 탐사를 통해 도출된 전력 및 수자원 효율화 전략	47
i. 탐사의 의의	47
ii. 정책적 제언	49
iii. 탐사의 한계 및 추가 고찰	67

III. 결론	84
i. 탐사 핵심 내용 요약	84
ii. 탐사의 의의	86
iii. 후속 연구 방향	87
IV. 참고문헌	89
<부록>	92
i. E-Cube 현수막 및 명찰	92
ii. 컨택용 팀 소개 PPT	93
iii. 인터뷰이와 촬영한 사진	94
iv. 현장 탐사 및 회의 사진	95

탐 사 개 요

본 해외 탐사는 미국 반도체 클러스터가 직면한 에너지 및 수자원 부담 문제를 단순한 개별 기술의 효율 개선이 아닌, 클러스터 차원의 인프라 설계와 운영 구조의 문제로 재인식하고, 이를 통해 국내 반도체 클러스터 정책에 적용 가능한 시사점을 도출하고자 수행되었다. 특히 반도체 공정의 미세화와 함께 초고순도수(UPW) 사용량과 전력 수요가 구조적으로 증가하는 상황에서, 기존의 공정 내부 최적화 중심 접근만으로는 장기적인 지속가능성을 확보하기 어렵다는 문제의식에서 출발하였다.

먼저 Intel 현직자 인터뷰를 통해, 애리조나 반도체 클러스터의 실제 운영 방식과 의사결정 논리를 확인하였다. 해당 클러스터에서는 전력, 물, 화학물질과 같은 핵심 유틸리티가 중앙집중형으로 관리되며, 절감보다는 무중단 운영과 품질 안정성이 최우선 가치로 설정되어 있었다. 반도체 팩은 도시와 자원을 경쟁하는 존재가 아니라, 도시 인프라의 규칙 안에서 작동하는 하나의 구성 요소로 위치 지워져 있었으며, 물 재이용, 전력 공급, HVAC 설계 모두 이러한 운영 철학을 전제로 구축되어 있었다. 이는 반도체 클러스터의 에너지 및 수자원 문제가 기술 문제가 아니라 구조적·정책적 문제임을 분명히 보여주는 출발점이 되었다.

이러한 운영 현실을 바탕으로, Marisol Cira 박사와의 인터뷰에서는 반도체 수자원 문제를 공정 내부 기술이 아닌, 공정 외부에 위치한 하수, 폐수 처리 및 재이용 인프라의 관점에서 재해석하였다. 인터뷰를 통해 확인된 핵심은, 초고순도수 재이용의 성패가 단일 처리 효율이나 제거율이 아니라, 장기 운전 안정성, 에너지 소비, 막 오염, 유지관리 등 시스템 전반의 상호작용에 의해 결정된다는 점이었다. 이는 반도체 수처리 시스템을 단순한 보조 설비가 아닌, 클러스터 지속가능성을 좌우하는 핵심 기반 인프라로 인식해야 함을 시사하였다.

이어 Golwala 박사와의 인터뷰에서는 이러한 시스템 관점을 실제 운전 가능한 파일럿 규모 공정으로 확장할 수 있는 가능성이 논의되었다. 특히 AnMBR 기반 전처리 공정은 에너지 회수와 장기 운전 안정성 측면에서 후단 고도 정수 공정의

부담을 구조적으로 완화할 수 있는 잠재력을 보여주었으며, 전처리 단계가 전체 수자원 재이용 시스템의 성능과 에너지 소비를 결정하는 핵심 요소임이 강조되었다. 이를 통해 반도체 수처리 논의가 후단 RO, AOP 중심에서 전처리-후처리를 포함한 통합 구조로 전환될 필요성이 명확해졌다.

UCLA 이상석 박사와의 인터뷰에서는 이러한 통합 구조 내에서도 기술적으로 해결되지 않은 병목이 보다 정밀하게 드러났다. 반도체 폐수는 나노 입자, 미량 금속 이온, 난분해성 유기물 등 복합 오염물로 구성되어 있으며, UF-RO-결정화 공정이 분절적으로 운영될 경우 장기 운전 안정성과 에너지 효율에 한계가 발생한다는 점이 확인되었다. 특히 공정 미세화로 인해 기존 입자·이온 중심 관리 체계로는 대응하기 어려운 초미량 불순물이 새로운 수질 리스크로 부상하고 있다는 지적은, 향후 재이용 정책과 수질 기준의 재정립 필요성을 시사하였다.

USC Binglin Guo 박사와의 인터뷰는 이러한 논의를 한계 오염물질이라는 관점에서 종합하는 역할을 수행하였다. PFAS 사례는 반도체 수자원 재이용이 단순히 회수율을 높이는 문제로 접근될 경우, 오히려 에너지 소비와 공정 리스크를 동시에 확대할 수 있음을 보여준다. 특히 제거 기술의 성능뿐 아니라 분석 인프라와 검증 체계 자체가 정책 적용의 병목으로 작용하고 있다는 점은, 반도체 클러스터 수자원 정책이 기술·에너지·분석·운전을 동시에 고려하는 통합 설계 문제임을 분명히 했다.

이러한 탐사 결과를 종합한 후, 본 연구는 기존 반도체 수자원 논의에서 상대적으로 다뤄지지 않았던 영역으로 시야를 확장하였다. Amin Mojiri 박사의 AWH 연구는 액상 폐수 중심의 수처리 인프라가 포착하지 못하는 수증기 형태의 손실을 새로운 관리 대상으로 제시함으로써, 반도체 클러스터 물 수지(water balance)의 경계를 확장하는 계기를 제공하였다. 이는 AWH를 기존 수처리 기술의 대안으로 제시하기보다는, 폐열 활용을 전제로 한 보조적 수자원 회수 옵션으로 검토함으로써, 기존 인프라의 한계를 보완할 수 있는 가능성을 탐색하는 방향으로 의미를 가진다.

종합적으로 본 해외 탐사는 미국 반도체 클러스터의 에너지·수자원 문제를 개

별 기술의 우열이나 단기 효율 개선의 문제가 아닌, 클러스터 차원의 인프라 설계 철학과 운영 구조의 문제로 재정의하였다. 이러한 시각은 향후 용인 반도체 클러스터와 같은 대규모 산업 단지에서 에너지와 물을 절감 대상이 아닌, 안정성과 지속가능성을 중심으로 통합 설계해야 함을 시사하며, 본 연구의 정책적 제언과 미 연구 영역 도출의 핵심 논리적 기반을 형성한다.

I. 서론

i. 연구 주제

본 해외 탐사의 주제는 용인 반도체 클러스터의 전력 및 수자원 효율화 문제를 클러스터 차원의 인프라 설계와 운영 구조의 관점에서 재정의하고, 미국 반도체 클러스터 사례를 통해 국내 적용 가능한 정책적·기술적 시사점을 도출하는 것이다.

특히 반도체 공정의 미세화와 함께 구조적으로 증가하는 초고순도수(UPW) 사용량과 전력 수요를 단순한 공정 내부 효율 문제로 한정하지 않고, 반도체 클러스터 전체의 자원 흐름과 운영 논리 속에서 분석하는 것을 핵심 목표로 설정하였다.

이를 위해 본 탐사는 미국 반도체 클러스터가 직면한 에너지 및 수자원 부담을 개별 기술의 성능 비교나 단기적 절감 전략이 아닌, 도시-클러스터-공정이 연결된 인프라 시스템의 문제로 인식하고, 실제 산업 및 연구 현장에서 이러한 문제가 어떻게 정의되고 해결되고 있는지를 직접 확인하고자 수행되었다.

ii. 논의 배경

반도체 산업은 미세화 공정의 고도화와 함께 자원 소비의 성격 자체가 질적으로 변화하고 있다. 공정 안정성과 수율 확보를 위해 초순수(UPW)에 대한 의존도가 지속적으로 증가하고 있으며, 세정·린스 공정의 반복과 강화로 인해 물 사용량은 공정 미세화와 함께 구조적으로 확대되는 양상을 보인다. 이러한 물 사용 증가는 단순한 공정수 소비에 그치지 않고, UPW 생산 과정, 폐수 처리 및 재이용 공정, 냉각·공조 설비 운전에 이르기까지 연쇄적인 에너지 소비 증가를 동반한

다. 그 결과 반도체 제조 공정은 물과 에너지가 상호 결합된 형태로 소비되는 고 집약적 시스템으로 진화하고 있다.

이러한 변화는 반도체 수자원 문제를 단순히 “물을 얼마나 사용하는가”의 문제가 아니라, 물-에너지-운영 안정성이 긴밀하게 얽힌 복합 시스템의 문제로 확장시킨다. 특히 공정 미세화가 진행될수록 수질 요구 조건은 더욱 엄격해지고, 공정 변동성에 대한 허용 범위는 좁아지기 때문에, 수자원 관리 실패는 곧바로 공정 안정성과 생산 차질로 이어질 수 있다. 즉, 반도체 수자원 문제는 생산 효율의 문제가 아니라 산업 전반의 신뢰성과 지속가능성을 좌우하는 핵심 요소로 자리 잡고 있다.

국내 반도체 산업과 학계에서는 이러한 문제의식을 바탕으로 공정 조건 최적화, 고도 수처리 기술, 재이용 공정 고도화 등 기술 중심의 연구가 활발히 이루어지고 있다. UCLA, USC 등 해외 대학 연구기관 역시 막 공정, 고급 산화 공정, 신종 오염물질 제거 기술 등 반도체 수자원 문제 해결을 위한 다양한 기술적 접근을 축적해오고 있다. 이러한 기술 연구는 반도체 수자원 문제 해결의 필수적인 기반임은 분명하다. 그러나 개별 기술의 성능 향상이나 공정 단위의 최적화 성과가, 대규모 반도체 클러스터의 장기 운전 안정성과 인프라 설계, 정책적 의사결정으로 어떻게 연결되어야 하는지에 대한 논의는 상대적으로 충분히 정리되지 않은 상태이다.

특히 조성 중인 용인 반도체 클러스터는 다수의 반도체 팹이 집적된 대규모 산업단지로서, 개별 공정이나 단일 팹 차원의 효율 개선만으로는 해결하기 어려운 수자원 및 에너지 부담을 구조적으로 내포하고 있다. 반도체 공장은 지역 사회와 수자원을 공유하는 환경 속에서 운영될 수밖에 없으며, 이러한 조건에서는 물 사용량 자체보다도 공급 안정성, 재이용 시스템의 신뢰성, 장기 운전 가능성이 핵심 쟁점으로 부상한다. 이로 인해 반도체 수자원 문제는 더 이상 특정 기술의 적용 여부를 넘어, 클러스터 차원의 인프라 설계와 운영 구조를 어떻게 설정할 것인가의 문제로 재인식될 필요성이 커지고 있다.

iii. 논의의 필요성

반도체 수자원 문제에 대한 기존 논의는 주로 개별 공정이나 특정 처리 기술의

성능 개선에 초점을 맞추어 발전해 왔다. 이러한 접근은 공정 조건 최적화, 고도 수처리 기술 개발, 재이용률 향상 등 기술적 진전을 이끌어 왔다는 점에서 중요한 성과를 지닌다. 그러나 이러한 기술 중심의 논의만으로는, 다수의 반도체 팹이 집적된 대규모 클러스터 환경에서 발생하는 수자원 문제를 충분히 설명하거나 관리하기에는 구조적인 한계가 존재한다.

특히 반도체 클러스터 단위에서는 개별 기술의 성능보다도, 여러 공정과 설비가 동시에 작동하는 상황에서 공급 안정성, 장기 운전 신뢰성, 시스템 간 상호 의존성이 훨씬 더 중요한 변수로 작용한다. 예를 들어, 특정 수처리 기술이 단일 공정 기준에서는 우수한 성능을 보이더라도, 에너지 소비 증가, 유지관리 부담, 공정 간 연계 문제로 인해 클러스터 전체의 운영 안정성을 저해할 수 있다. 이처럼 기술적으로 가능한 해법과 실제로 지속 가능한 운영 방식 사이에는 본질적인 간극이 존재한다.

그럼에도 불구하고 기존 연구에서는 이러한 간극을 클러스터 차원의 인프라 설계와 운영 구조의 문제로 체계적으로 분석한 사례는 상대적으로 제한적이다. 수자원 재이용은 종종 회수율이나 제거 효율이라는 단일 지표로 평가되지만, 대규모 반도체 클러스터에서는 이러한 지표만으로 장기적인 운영 가능성을 판단하기 어렵다. 오히려 에너지 소비, 유지관리 복잡성, 분석 및 모니터링 체계, 정책적 의사결정 구조가 함께 고려되지 않을 경우, 재이용 시스템은 새로운 리스크 요인으로 작용할 가능성도 존재한다.

조성 중인 용인 반도체 클러스터와 같이 국가 산업 전략 차원에서 추진되는 대규모 집적 단지의 경우, 이러한 문제는 더욱 중요하게 다뤄질 필요가 있다. 클러스터가 지역 사회와 수자원을 공유하는 구조 속에서 운영되는 이상, 수자원 관리는 단일 기업이나 공정의 선택 문제가 아니라, 사전에 설계된 인프라 구조와 정책적 기준에 의해 좌우되는 공공적 문제의 성격을 지닌다. 따라서 기술 개발 성과를 어떻게 클러스터 차원의 인프라 설계와 운영 전략으로 연결할 것인지는, 단순한 기술 검토를 넘어선 종합적인 분석이 요구된다.

이러한 맥락에서 본 탐사는 반도체 수자원 문제를 개별 기술의 우열이나 단기적 효율 개선의 관점에서 벗어나, 클러스터 차원의 구조적·시스템적 문제로 재구성할 필요성에서 출발한다. 특히 해외 반도체 클러스터가 수자원 문제를 어떤 인

프라 설계 논리와 운영 기준 속에서 다루고 있는지를 분석하는 것은, 향후 용인 반도체 클러스터의 수자원 정책과 운영 전략을 구체화하는 데 있어 필수적인 선행 과정이라 할 수 있다.

iv. 연구 방법

본 탐사는 반도체 수자원 문제를 개별 기술의 성능 비교가 아니라, 반도체 클러스터를 지탱하는 인프라와 운영 구조의 관점에서 분석하기 위해 문헌 조사와 현지 전문가 심층 인터뷰를 결합한 질적 연구 방식으로 수행되었다. 이는 정량 지표 중심의 기존 연구만으로는 충분히 포착하기 어려운 운영 안정성, 의사결정 과정, 정책적 제약 조건을 함께 살펴보기 위한 방법론적 선택이다.

사전 단계에서는 글로벌 반도체 기업의 ESG 보고서와 반도체 공정, 수자원, 에너지 관련 기존 연구 문헌을 검토하여 반도체 제조 공정에서의 물 사용 구조와 초순수 재이용을 둘러싼 주요 논점을 정리하였다. 이 과정에서 수자원 문제가 공정 내부의 기술적 이슈를 넘어, 인프라와 운영 차원의 문제로 확장되고 있음을 이론적으로 검토하였으며, 이를 바탕으로 현지 탐사에서 중점적으로 확인해야 할 질문을 설정하였다.

현지 탐사 단계에서는 반도체 산업 및 수자원 연구와 직접적으로 연계된 기관을 방문하여 공정 운영자와 연구자를 대상으로 심층 인터뷰를 진행하였다. 인터뷰에서는 반도체 수처리 공정의 구성과 운전 조건, 전처리와 후처리 공정의 역할, 공정 단계별 한계와 병목 등 수처리 공정 자체에 대한 기술적 논의를 충분히 다루었다. 동시에 이러한 공정이 실제 클러스터 환경에서 어떻게 운전되고 유지되는지, 그리고 장기 운전 안정성, 에너지 소비, 유지관리 부담과 같은 요소가 기술 선택과 시스템 설계에 어떤 영향을 미치는지를 중심으로 논의를 이어갔다. 이를 통해 문헌만으로는 확인하기 어려운 운영상의 제약과 현실적인 고려 요소를 질적으로 수집하였다.

탐사 이후에는 문헌 조사와 인터뷰에서 얻은 내용을 종합하여 반도체 수자원 문제를 개별 수처리 기술의 문제가 아니라, 공정과 인프라, 정책이 서로 맞물려 작동하는 시스템 차원의 문제로 재구성하였다. 이를 바탕으로 용인 반도체 클러스터의 조성 과정과 향후 운영 과정에서 고려해야 할 구조적 쟁점과 기술 연구와 운영

사이의 연결이 충분히 이루어지지 않은 영역을 정리하고, 이후 기술 연구와 정책 설계를 연계하기 위한 분석의 출발점을 제시하였다.

II. 본론

a. 반도체 클러스터의 전력 수자원 효율화 전략 관련 기존 문헌 연구

i. 기존 논의 요약 및 정리

기존 문헌에서 반도체 산업의 수자원 문제는 주로 초순수(UPW) 수요의 지속적인 증가에 대응하기 위한 기술적 과제로 다뤄져 왔다. 반도체 공정의 미세화와 공정 단계의 복잡화로 인해 단위 생산량당 공정수 사용량이 증가함에 따라, 안정적인 고순도 공정수 확보는 반도체 제조시설의 경쟁력과 직결되는 핵심 요소로 인식되어 왔다. 이에 따라 연구들은 외부 수자원 의존도를 낮추고 제조시설 내부 또는 클러스터 차원에서 공정수를 재이용하는 체계를 고도화하는 데 초점을 맞추어 전개되었다.

특히 대규모 제조시설(Fab) 확장으로 인해 발생하는 막대한 폐수량은 처리 부담을 넘어, 용수 확보 비용과 환경 규제 대응이라는 측면에서 중요한 이슈로 부각되었다. 기존 연구들은 이러한 문제에 대응하기 위해 반도체 폐수를 고도 처리하여 재이용수로 전환하는 기술적 해법을 중심으로 논의를 전개해 왔으며, 그 핵심으로 막 여과 기반 공정(UF-RO-NF)과 농축수 관리 및 무방류 기술(ZLD, MLD)을 제시해 왔다. 이들 공정은 반도체 산업이 요구하는 고순도 수질 기준을 충족하면서도 높은 회수율을 달성할 수 있는 표준적 접근으로 자리 잡았다.

기존 문헌은 반도체 폐수가 일반 산업폐수와 달리 나노입자, 미량 금속 이온, 산·염기성 화학물질, 공정 특이적 유기물 등 다양한 오염물질이 복합적으로 존재하는 고난도 처리 대상이라는 점을 공통적으로 전제한다. 이러한 복합 오염 특성으로 인해 단일 공정에 의존하기보다는, 오염물질 특성에 따라 단계적으로 제거하는 다단계 정밀 분리 공정이 불가피하다는 인식이 연구 전반에 걸쳐 공유되어 왔다. 이에 따라 각 처리 단계의 제거 효율과 공정 간 조합 최적화가 주요 연구 주제로 다뤄져 왔다.

한편 반도체 공정의 지속적인 미세화와 소재·화학물질의 다양화에 따라, 기존

의 입자·이온 중심 수질 관리 체계로는 충분히 설명되지 않는 초미량 오염물질의 중요성도 점차 주목받기 시작했다. 이들 물질은 농도는 매우 낮지만 반도체 공정의 높은 민감도 특성상 장기적인 품질 안정성에 영향을 미칠 수 있는 요소로 인식되며, 분석 대상과 관리 범위를 확장해야 할 필요성이 기존 논의 속에서 점진적으로 제기되어 왔다.

최근의 문헌에서는 공정수 재이용을 단순히 회수율 향상 문제로 한정하지 않고, 에너지 소비, 탄소 배출, 장기 운전 안정성을 함께 고려하는 방향으로 논의가 확장되고 있다. 막 오염(fouling), 농축수 처리 과정에서의 에너지 부담, 장기 운전 시 성능 저하와 같은 요소들이 주요 고려 대상으로 포함되면서, 수처리 공정은 단순한 보조 설비를 넘어 대규모 반도체 제조 인프라의 핵심 구성 요소로 인식되고 있다. 일부 연구에서는 혐기성 막 생물반응기(AnMBR)나 고도 전처리 공정을 통해 유기물 부하를 저감하고 에너지 회수율을 시도하는 접근을 제시하며, 수처리 시스템을 자원·에너지 순환 관점에서 재해석하려는 흐름도 나타나고 있다.

ii. 기존 연구의 한계점

기존 연구는 반도체 산업의 수자원 문제를 기술적으로 정교화하는 데 기여했음에도 불구하고, 대규모 반도체 제조 클러스터의 형성과 장기적 운영이라는 맥락에서는 여러 구조적 한계를 드러낸다. 가장 근본적인 한계는 다수의 연구가 반도체 수자원 문제를 개별 공정 또는 단일 기술의 성능 개선 문제로 환원해 다루어 왔다는 점이다. UF, RO, NF, ZLD와 같은 개별 공정의 제거 효율, 회수율, 운전 조건 최적화에 대한 논의는 풍부하지만, 이들 공정이 하나의 연속적 시스템으로 결합될 때 발생하는 상호작용과 누적 효과에 대한 분석은 상대적으로 제한적이다.

특히 실험실 규모 또는 단일 파일럿 설비를 기반으로 한 연구 결과가, 실제 Fab 또는 클러스터 규모로 확장될 경우 발생하는 에너지 소비의 누적 증가, 운영 복잡성, 시스템 취약성은 충분히 검증되지 않았다. 고회수율을 달성하기 위해 공정 단계가 늘어날수록 막 오염, 세정 빈도 증가, 유지관리 비용 상승과 같은 문제가 구조적으로 확대되지만, 기존 연구는 이러한 요소를 개별 공정 수준에서 분절적으로 다루는 경향이 강하다. 그 결과, 기술적으로는 가능하나 장기 운전 관점에서는 불안정한 시스템 설계가 암묵적으로 정당화되는 한계를 가진다.

또 다른 중요한 한계는 반도체 폐수 재이용 논의가 회수율 극대화라는 단일 목표에 과도하게 집중되어 왔다는 점이다. 다수의 연구는 재이용률을 기술 성능의 핵심 지표로 설정하고, 이를 높이는 방향으로 공정 설계를 제안해 왔다. 그러나 이러한 접근은 회수율 향상에 수반되는 에너지 소비 증가, 탄소 배출 확대, 운영 리스크 증대라는 트레이드오프를 충분히 고려하지 못한다. 결과적으로 기존 연구는 “얼마나 많이 회수할 수 있는가”에 대한 답은 제공하지만, “그 회수가 지속 가능한가”라는 질문에는 충분히 답하지 못하고 있다.

분석 및 검증 인프라 측면에서도 한계가 두드러진다. 최근 문헌에서 초미량 오염물질, 특히 PFAS와 같은 난분해성 물질의 중요성이 강조되고 있음에도 불구하고, 실제 산업 현장에서 요구되는 수준의 검출 한계, 분석 주기, 표준화된 검증 체계에 대한 논의는 매우 제한적이다. 많은 연구가 특정 제거 기술의 성능을 실험적으로 제시하지만, 그 결과를 뒷받침하는 분석 인프라가 현장에 존재하는지, 또는 장기적으로 유지 가능한지에 대한 검토는 부족하다. 이로 인해 기술적 가능성과 정책·운영 현실 사이에 간극이 발생한다.

또한 기존 연구는 반도체 폐수의 수질 특성을 주로 입자, 이온, 총유기탄소(TOC)와 같은 전통적 지표를 중심으로 평가해 왔으며 초미량 오염물질의 장기 누적 효과나 공정 민감도와 연계성에 대해서는 상대적으로 단편적인 접근에 머무른다. 이는 반도체 공정의 특성상 극저농도 오염물질이라 하더라도 공정 수율이나 장비 신뢰성에 영향을 미칠 수 있음에도, 기존 관리 체계가 이러한 리스크를 충분히 포착하지 못할 가능성을 내포한다.

에너지 관점에서의 한계 역시 명확하다. RO 및 ZLD 기반 고회수율 시스템은 본질적으로 높은 에너지 소비를 수반하지만, 기존 연구는 이를 개별 공정의 효율 개선 문제로 환원해 다루는 경우가 많다. 반면, 클러스터 규모에서 다수의 Fab이 동시에 운영될 경우 발생하는 전력 수요 집중, 에너지 인프라 부담, 탄소 배출 누적 효과에 대한 정량적 분석은 충분히 축적되지 않았다. 이로 인해 수자원 재이용 시스템이 전력·에너지 인프라와 어떻게 결합되어야 하는지에 대한 종합적 논의가 제한된다.

운영 및 제도적 측면에서도 한계가 존재한다. 대부분의 기존 연구는 기술 개발과 공정 설계에 초점을 맞추고 있으며, 해당 기술이 실제 산업 현장에서 적용되기

위해 필요한 운영 인력, 유지관리 역량, 규제 대응 체계에 대해서는 상대적으로 관심이 적다. 특히 초고도 처리 공정은 숙련된 운영 인력과 지속적인 모니터링을 요구하지만, 이러한 조건이 모든 반도체 클러스터에서 충족 가능한지에 대한 현실적 검토는 부족하다.

마지막으로, 기존 연구는 반도체 산업 외부에 위치한 수처리 인프라 및 전문 인력과의 연결성을 충분히 고려하지 못하고 있다. 수자원 재이용 시스템은 반도체 제조 공정 내부 문제에 그치지 않고, 지역 수자원 시스템, 전력 인프라, 환경 규제 체계와 긴밀히 연결되어 있음에도 불구하고, 기존 문헌은 이를 독립적인 기술 문제로 다루는 경향이 강하다. 이로 인해 반도체 클러스터 차원의 정책 설계나 공공 자원 방향을 도출하는 데 필요한 통합적 시사점이 제한적으로 제시된다.

종합하면, 기존 연구는 반도체 수자원 재이용 기술의 기술적 가능성을 확장하는 데에는 중요한 기여를 했으나, 대규모 클러스터 적용, 장기 운영 안정성, 에너지·분석·제도 인프라와의 연계라는 측면에서는 여전히 공백을 남기고 있다. 이러한 한계는 향후 연구가 단순한 기술 고도화를 넘어, 반도체 산업을 지탱하는 수자원 인프라 전체를 하나의 시스템으로 재구성할 필요성을 시사한다.

iii. 연구를 통해서 한계를 극복할 수 있는 점

본 탐사 연구는 기존 연구가 주로 개별 공정의 성능이나 기술적 가능성에 초점을 맞추어 왔던 접근에서 벗어나, 반도체 산업의 수자원 문제를 대규모 제조 클러스터를 지탱하는 인프라 시스템 차원에서 재구성한다는 점에서 중요한 기여를 가진다. 본 연구는 특정 처리 기술의 우수성을 입증하는 것을 목표로 하지 않고, 반도체 공정이 요구하는 막대한 공정수 수요가 어떠한 수자원·에너지·분석 인프라에 의해 유지되고 있는지를 구조적으로 이해하는 데서 출발한다. 이는 기존 문헌에서 분절적으로 다루어졌던 기술, 에너지, 운영, 정책 요소를 하나의 연속적인 시스템으로 연결하려는 시도라는 점에서 차별성을 가진다.

특히 본 연구는 반도체 폐수 재이용 문제를 단순히 회수율 향상의 문제로 환원하지 않고, 회수율·에너지 소비·운영 안정성 간의 트레이드오프 관계를 핵심 분석 대상으로 설정한다. 이를 통해 기존 연구가 충분히 다루지 못했던 기술적으로 가능한 시스템과 장기적으로 유지 가능한 시스템 간의 차이를 명확히 드러낸다.

즉, 해외 사례와 전문가 인터뷰를 통해 고회수율 공정이 실제 현장에서는 에너지 부담, 막 오염, 유지관리 복잡성으로 이어질 수 있음을 종합적으로 정리함으로써, 기술 성능 지표만으로는 평가할 수 없는 운영 현실을 분석의 중심에 위치시킨다.

또한 본 연구의 중요한 기여는 초미량 오염물질, 특히 PFAS와 같은 한계 오염 물질을 수자원 재이용 논의의 중심으로 끌어올렸다는 점에 있다. 기존 문헌에서는 제거 기술의 가능성 자체에 초점이 맞추어졌던 반면, 본 연구는 분석 인프라와 검증 체계가 갖추어지지 않은 상태에서 기술 도입이 이루어질 경우 발생할 수 있는 정책적/ 운영적 리스크를 함께 조명한다. 이는 수질 관리 문제를 단순한 처리 기술의 문제가 아니라, 분석 역량/ 표준화/ 모니터링 체계가 결합된 시스템 신뢰성 문제로 재정의하는 시도이다.

아울러 본 연구는 반도체 산업 내부의 시각에 국한되지 않고, 반도체 산업 외부에 위치한 수처리·환경·에너지 전문가의 관점을 적극적으로 통합한다. 이를 통해 기존 반도체 중심 문헌이 충분히 포착하지 못했던 전처리 공정의 중요성, 장기 운전 안정성, 공정 간 의존 관계를 보다 입체적으로 해석한다. 이러한 접근은 반도체 수자원 재이용 시스템이 단독으로 존재하는 것이 아니라, 지역 수자원 시스템 및 에너지 인프라와 긴밀히 연결되어 있음을 드러내며, 클러스터 차원의 인프라 설계 필요성을 강조한다.

또한, 정책적 시사점을 도출할 수 있는 구조를 갖는다. 기존 연구가 기술 개발의 방향성을 제시하는 데 그쳤다면, 본 연구는 무엇을 더 개발해야 하는가가 아니라 무엇을 함께 구축해야 하는가 라는 질문을 제기한다. 즉, 고도 처리 기술에 대한 투자뿐 아니라, 분석 인프라 확충, 장기 실증 기반 마련, 운영 인력 양성, 에너지 수자원 통합 설계에 대한 지원이 병행되어야 함을 논리적으로 도출한다. 이는 향후 반도체 클러스터 조성 및 확장 과정에서 정책 설계의 기준점으로 활용될 수 있는 기여이다.

마지막으로, 본 연구는 학생 주도의 탐사라는 특성을 활용하여, 기존 연구가 접근하기 어려웠던 현장 중심의 질적 정보를 축적한다. 해외 전문가 인터뷰를 통해 문헌에서는 명시적으로 드러나지 않았던 운영상의 병목, 기술 적용 시의 현실적 제약, 정책과 기술 간 괴리를 정리함으로써, 정량 데이터 중심 연구를 보완하는 역할을 수행한다. 이는 향후 보다 정교한 후속 연구를 설계하는 데 기초 자료로

활용될 수 있다.

종합적으로 볼 때, 본 탐사 연구는 기존 연구의 한계를 단순히 비판하는 데 그치지 않고, 반도체 수자원 재이용 문제를 기술/ 에너지/ 분석/ 운영/ 정책이 결합된 통합 인프라 설계 문제로 재정의 한다는 점에서 의미 있는 기여를 가진다. 이러한 접근은 반도체 산업의 지속가능성을 논의하는 데 있어, 기술 고도화 중심 논의에서 한 단계 나아가 인프라 시스템 전체를 조망하는 새로운 분석 틀을 제공하며, 향후 학술 연구와 정책 논의의 연결 고리로 기능할 수 있다.

b. 연구 방법 제시

i. 현지조사 및 전문가 인터뷰의 필요성

반도체 클러스터의 전력·수자원 효율화 문제는 개별 공정 기술이나 단위 설비의 성능 개선만으로 해결될 수 없는 구조적 성격을 지닌다. 반도체 제조시설은 초고순도수(UPW)와 대규모 전력을 상시적으로 요구하며, 공정 미세화와 집적도 고도화가 진행될수록 이러한 자원 수요는 기하급수적으로 증가하는 양상을 보인다. 그러나 실제 전력 소비와 수자원 사용 구조는 특정 공정이나 장비의 효율 지표에 의해 단순히 설명되지 않으며, 공정의 상시 가동 특성, 냉각·공조 설비 운영 방식, 수자원 재이용 시스템 구성, 그리고 이를 둘러싼 지역 인프라와 정책 환경에 의해 종합적으로 규정된다.

기존 문헌 연구와 기술 보고서는 반도체 공정별 에너지 소비 특성이나 수처리 기술의 이론적 성능을 제시하는 데에는 유용하지만, 이러한 요소들이 실제 클러스터 운영 환경에서 어떻게 결합되고 상호작용하는지를 충분히 설명하는 데에는 한계를 가진다. 특히 전력 공급의 안정성 확보, 수자원 재이용률 증가에 따른 에너지 소비 증가 문제, 고도 수처리 공정의 장기 운전 안정성, 미량 오염물질 관리와 분석 인프라의 제약과 같은 핵심 이슈는 문헌상 수치나 개념 정리만으로는 파악하기 어렵고, 실제 운영 경험과 의사결정 과정 속에서 드러나는 경우가 많다.

또한 반도체 제조시설은 장비와 공정을 임의로 정지하거나 재가동하기 어려운 상시 운전 구조를 가지며, 이로 인해 전력과 물의 사용은 순간적인 효율보다 장기적인 누적 소비 구조에 의해 결정된다. 이러한 특성은 이론적으로는 효율적인 기술이라 하더라도, 실제 적용 단계에서는 예상과 다른 에너지·수자원 부담을 초래

할 수 있음을 의미한다. 특히 재이용수 확대 과정에서 발생할 수 있는 biofouling, 난분해성 유기물, 한계 오염물질 문제는 기술적 제거 가능성보다 운영 리스크와 관리 부담 측면에서 더 큰 제약으로 작용하는 경우가 많다.

이와 같은 이유로 본 연구는 반도체 클러스터의 전력·수자원 문제를 단순한 기술 도입 여부의 문제가 아닌, 실제로 ‘운영되는 인프라 시스템’의 문제로 인식하고 접근하였다. 이를 위해 국내외 반도체 관련 시설과 클러스터를 대상으로 한 현지조사와, 전력·수자원·공정·시스템 설계 분야의 전문가 인터뷰를 핵심 연구 방법으로 채택하였다. 현지조사와 인터뷰를 통해 문헌으로는 포착하기 어려운 운영 현실, 병목 요인, 의사결정 논리를 직접 확인함으로써, 반도체 클러스터 차원의 효율화 전략을 보다 현실적인 기반 위에서 도출하고자 하였다.

ii. 현지조사 및 전문가 인터뷰를 통해서 얻을 수 있는 기대효과

현지조사 및 전문가 인터뷰를 통해 기대되는 가장 중요한 효과는 반도체 클러스터의 전력·수자원 소비 구조를 실질적인 운영 관점에서 재구성할 수 있다는 점이다. 이를 통해 공정별 평균 소비량이나 설계상 효율 수치가 아니라, 상시 가동 구조, 냉각 및 공조 설비 운전, 수자원 재이용 과정에서의 추가 에너지 투입 등 실제 조건 하에서 누적되는 자원 부담을 종합적으로 파악할 수 있다. 이러한 접근은 반도체 클러스터의 에너지·수자원 문제가 단기적 효율 저하가 아닌, 구조적·시스템적 문제임을 명확히 드러내는 데 기여한다.

두 번째 기대효과는 기술적 가능성과 정책·운영 현실 간의 간극을 구체적으로 식별할 수 있다는 점이다. 고도 수처리 기술, 재이용 공정, 저전력 설계 기술은 이론적으로 높은 잠재력을 지니고 있으나, 실제 클러스터 적용 단계에서는 에너지 비용 증가, 유지관리 복잡성, 분석 인프라의 한계, 사회적 수용성 문제 등으로 인해 적용 범위가 제한되는 경우가 많다. 전문가 인터뷰를 통해 이러한 제약 조건을 사전에 인식함으로써, 향후 효율화 전략과 정책 제언이 기술 낙관론에 머무르지 않고 현실적인 실행 가능성을 확보할 수 있다.

세 번째로, 현지조사는 반도체 클러스터를 개별 제조시설의 집합이 아닌, 도시·지역 인프라와 결합된 통합 시스템으로 이해할 수 있는 분석 틀을 제공한다. 전력과 수자원은 특정 기업만의 문제가 아니라 지역 사회와 공유되는 인프라이며,

클러스터의 지속 가능성은 도시 차원의 관리 체계, 사회적 합의, 정책적 유인 구조에 의해 좌우된다. 이러한 관점은 반도체 클러스터의 효율화 전략이 공정 내부 최적화에만 머무를 수 없으며, 클러스터 단위의 인프라 설계와 운영 전략으로 확장되어야 함을 시사한다.

마지막으로, 본 연구 방법을 통해 확보된 현장 기반 정보와 전문가의 통찰은 해외 사례를 단순히 모방하거나 수치적으로 비교하는 데 그치지 않고, 국내 반도체 클러스터 여건에 적합한 전력·수자원 효율화 전략을 재구성하는 데 활용될 수 있다. 이는 본 연구가 기술 중심 분석을 넘어, 반도체 클러스터의 장기적 지속 가능성을 뒷받침하는 인프라·정책 설계 연구로 확장되는 데 핵심적인 기반을 제공할 것으로 기대된다.

c. 탐사 내용

i. 국내 탐사

1. (주)서플러스글로벌 (SurplusGLOBAL)

가. 조사 개요

본 연구의 목적을 달성하기 위해 국내 반도체 장비 생태계의 핵심 거점인 (주)서플러스글로벌 용인 클러스터를 방문하여 현장 조사를 실시하였다. 중고 장비의 리퍼비시 및 유통 과정에서 발생하는 에너지 소비 현황을 파악하고, 국내 반도체 운영 인프라의 지속 가능성을 분석하였다.

나. 주요 현장 조사 내용

1) 고에너지 소비 장비 및 공정 환경 확인

현장 시찰 결과, Canon 사의 노광 장비를 포함한 다수의 포토(Lithography) 공정 장비가 운용되고 있음을 확인하였다. 포토 공정은 극도의 정밀도를 유지해야 하는 특성상, 장비 자체의 가동 전력뿐만 아니라 클린룸 내 항온·항습 상태를 유지하기 위한 공조 시스템에 막대한 에너지가 상시 투입되고 있다.

2) 리페어 센터(Repair Center)를 통한 자원 순환

단순 장비 매매를 넘어 자체 리페어 센터를 운영하며 장비의 수리 및 성능 개선을 수행하고 있다. 이는 부품의 수명을 연장하고 신규 장비 제조 시 발생하는 탄소 발자국을 저감하는 효과를 가지며, 반도체 산업 내 '순환 경제' 모델의 실질

적인 구현 사례로 판단된다.

3) 전력 사용량 및 비용 분석

탐방을 통해 확인된 실제 전력 사용 데이터는 다음과 같으며, 이는 본 연구가 제안하는 에너지 효율화 모델의 필요성을 강력하게 뒷받침한다.

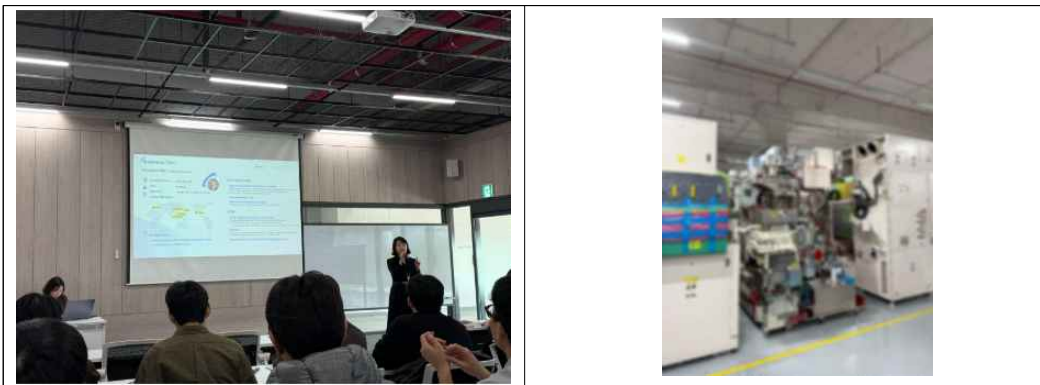
- 월간 전력 요금: 약 2억 원

- 연간 전력 요금: 약 15억 원

- 분석: 해당 시설은 대규모 양산 팹(Fab)이 아닌 장비의 유통, 테스트, 리퍼비시를 주 목적으로 하는 클러스터임에도 불구하고 연간 15억 원 규모의 막대한 전력 비용이 발생하고 있다. 이를 향후 구축될 '용인 반도체 메가 클러스터' 등 대규모 제조 단지에 대입할 경우, 전력 수급 및 비용 리스크는 기업의 경쟁력을 결정짓는 핵심 변수가 될 것으로 예측된다.

4) 소결 및 시사점

국내 반도체 산업은 제조업 강국으로서의 입지는 탄탄하나, 서플러스글로벌 사례에서 드러나듯 에너지 운영 비용에 대한 부담이 매우 높은 실정이다. 단일 클러스터에서 발생하는 연간 15억 원의 전력비는 에너지 효율화가 단순한 환경적 선택이 아닌 경제적 생존 전략임을 시사한다. 따라서 전력 및 수자원 효율화 모델이 고도화된 미국 반도체 클러스터의 사례를 탐사하고, 이를 국내 실정에 맞게 이식하는 전략 제안이 반드시 필요하다.



ii. 국내 전문가 인터뷰

1. 노광동 교수님 면담

가. 면담 개요

- 면담 대상: 노광동 교수 (물리학과 / 반도체 물리, 광전자 소자, 응용광학)
- 면담 일시: 2025년 9월 17일
- 자문 주제: 용인 반도체 클러스터의 전력 수요 구조 분석 및 에너지 공급 대안 탐색

나. 주요 면담 내용 및 분석

1) 반도체 공정 내 전력 소비 원인 분석

반도체 제조 공정 중 포토리소그래피(Photolithography)가 전체 전력 사용의 약 50%를 차지하는 핵심 요인임을 확인하였다. 특히 첨단 EUV 노광 장비는 고출력 레이저, 진공 시스템, 냉각 장치의 동시 가동이 필수적이어서 전력 집약도가 매우 높다. 이외에도 플라즈마 공정 및 이온 주입 장비 등이 복합적으로 전력 수요를 견인하고 있다.

2) 에너지 공급 체계의 현실적 대안 검토

RE100 달성을 위해 재생에너지와 ESS 도입은 필수적이거나, 현시점에서는 안정적인 전력 공급 보장에 한계가 존재한다. 이에 대한 가장 현실적인 무탄소 전력 대안으로 소형모듈원전(SMR)을 제시하였다. 한국의 전력 구조상 단기적으로는 LNG 발전을 병행하더라도, 중장기적인 탄소중립을 위해서는 SMR 등 안정적인 무탄소 에너지원 확보가 필수적임을 강조하였다.

다. 소결 및 시사점

노광동 교수와의 면담을 통해 용인 반도체 클러스터의 전력 문제는 단순한 전력 수급 확대의 문제가 아니라, 첨단 공정 자체가 구조적으로 고전력 수요를 내재하고 있다는 점에서 접근되어야 함을 확인하였다. 특히 EUV 노광 공정을 중심으로 한 포토리소그래피 단계는 전력 소비의 핵심 병목으로 작용하고 있으며, 이는 반도체 미세화·고집적화 전략이 전력 인프라 설계와 분리될 수 없음을 시사한다. 이러한 논의는 조성재 교수의 ‘저전력 공정·시스템 설계’ 관점과 결합될 때, 공정 효율 개선과 전력 수요 구조 완화를 동시에 고려할 수 있는 분석 틀을 제공한다. 더 나아가 서플러스글로벌이 제기한 현장 차원의 전력 불안정성 문제를 고려할 때, 안정적 무탄소 전력원 확보는 기술적 선택을 넘어 클러스터 존속을 좌우하는 인프라 조건임이 분명해진다. 따라서 미국 반도체 클러스터 탐사에서는 EUV

기반 첨단 공정 확산에 대응한 전력 공급 구조, 특히 SMR 등 안정적 무탄소 전원의 실제 적용 가능성과 제도적 수용 방식에 대한 사례 분석이 중점적으로 이루어질 필요가 있다.

2. 조성재 교수님 면담

가. 면담 개요

- 면담 대상: 조성재 교수 (융합전자반도체공학부(지능형반도체공학전공))
- 면담 방식: 서면 인터뷰 (질의응답 형식)
- 자문 주제: 차세대 반도체 소자(PIM 등) 및 시스템 설계를 통한 전력 수요 관리 및 자원 절약 가능성

나. 주요 면담 내용 및 분석

1) 반도체 미세화에 따른 발열 및 전력 누설 문제

트랜지스터의 크기가 작아짐에 따라 발생하는 발열 문제는 소자 자체보다 배선의 복잡도 증가에서 기인함을 확인하였다. 배선 폭과 간격이 좁아지면서 발생하는 RC 지연(RC delay)이 집적회로의 속도를 결정하고 발열을 유도하는 주원인이 된다. 또한, 소자의 미세화로 인해 트랜지스터가 완전히 꺼지지 않는 '누설 전류' 문제가 심화되어, 소자가 작동하지 않는 대기 상태에서도 에너지 소비가 지속되는 비효율이 발생함을 파악하였다.

2) PIM(Processing-in-Memory) 구조를 통한 효율화

기존 폰노이만 구조의 한계를 극복하기 위해 메모리 내부에서 연산을 처리하는 PIM 기술이 유망한 대안으로 제시되었다. PIM 구조를 채택할 경우 데이터 이동 과정에서 발생하는 배선의 에너지 소모와 시간 지연을 혁신적으로 줄일 수 있다. 이는 단순히 소자를 작게 만드는 방식에서 벗어나 시스템 구조의 근본적 변화를 통해 에너지 효율을 높일 수 있는 핵심 기술임을 확인하였다.

3) 제조 시설의 자원 절약과 설계 기술의 상관관계

반도체 소자의 저전력 설계와 실제 제조 공정(팹)의 전력·용수 수요 사이에는 상충 관계(Trade-off)가 존재함을 확인하였다. 단순히 소자를 작게 만드는 것은 제조 공정의 스텝 수를 늘려 오히려 생산 단계의 자원 소모를 키울 수 있다. 따라서 제조 시설의 전력 수요를 실질적으로 줄이기 위해서는 덜 복잡한 시스템 구조로

도 많은 일을 수행할 수 있는 '스마트한 집적공정' 개발과 컴퓨터 시스템 구조의 패러다임 전환이 병행되어야 한다는 점을 도출하였다.

다. 소결 및 시사점

조성재 교수와의 면담을 통해 반도체 산업의 지속 가능 운영은 단순히 개별 장비의 전력 절감을 넘어, 공정 단계 자체를 최적화할 수 있는 저전력 시스템 설계와 결합되어야 함을 확인하였다. 이는 앞선 노광동 교수의 '에너지 공급 전략'과 서플러스글로벌의 '현장 전력 리스크'를 해결하기 위한 기술적 보완점으로서 의미가 크다. 따라서 미국 반도체 클러스터 탐사 시, 첨단 시스템 반도체를 수용하기 위한 공정 단순화 및 스마트 집적공정 운영 사례를 중점적으로 분석할 필요가 있다.

iii. 해외 탐사

1) Intel Chandler Campus 김종수 엔지니어

이번 해외 탐사는 반도체 산업을 개별 공장이나 공정 단위가 아닌, 도시 및 지역 인프라와 결합된 클러스터 단위의 시스템으로 이해하는 데 초점을 두었다. 특히 애리조나 피닉스 및 챌들러 지역을 중심으로 형성된 반도체 클러스터는, 고온·건조한 사막 환경이라는 불리한 자연 조건 속에서도 산업이 안정적으로 운영될 수 있도록 도시 차원의 수자원 및 전력 인프라가 선제적으로 구축되어 운영되고 있다는 점에서 인상적이었다.

현장에서 확인된 가장 큰 특징은 반도체 팹이 도시 인프라와 분리된 고립된 시설이 아니라, 수자원과 전력의 순환 구조 속에 편입된 하나의 구성 요소로 기능하고 있다는 점이다. 피닉스 지역은 자연 하천이 거의 없는 환경임에도 불구하고, 인근 산간 지역의 댐에서 장거리로 물을 공급받고 이를 도시 전반에서 재이용하는 체계를 구축함으로써 산업과 도시가 동시에 물을 사용하는 구조를 형성하고 있다. 이러한 수자원 운영 방식은 반도체 팹의 물 사용이 도시 수자원 순환 경로의 일부로 인식되게 만든다.

또한 도시 곳곳에 분포한 운하와 인공 호수, 재이용수를 활용한 녹지 공간은 물 재이용이 특정 산업 시설에 국한된 기술적 대응이 아니라, 도시 경관과 생활 환경을 유지하는 기본 전제임을 보여준다. 이는 반도체 산업의 입지가 단순히 공장 부

지를 확보하는 문제를 넘어, 도시 전체의 물 관리 능력과 직결된다는 점을 시각적으로 확인할 수 있는 사례였다.

전력 인프라 역시 유사한 특징을 보였다. 고온 환경으로 인해 냉방과 공조 설비가 상시 가동되는 지역적 특성상, 전력 공급의 안정성은 산업 운영뿐 아니라 도시 생활 전반을 좌우하는 핵심 요소로 작용하고 있다. 이에 따라 전력 인프라는 단기적인 효율이나 비용 절감보다는, 기저부하를 안정적으로 담당할 수 있는 구조를 중심으로 설계·운영되고 있으며, 산업 시설 또한 이러한 도시 전력 운영 원칙을 전제로 입지하고 있다.

이러한 해외 반도체 클러스터의 운영 방식은 반도체 산업을 개별 기업의 문제로 한정하지 않고, 도시·산업·학계가 역할을 분담하는 통합 시스템으로 접근하고 있다는 점에서 한국의 반도체 클러스터 논의와는 차이를 보인다. 이번 탐사는 반도체 산업의 지속 가능성이 공정 기술뿐 아니라, 이를 지탱하는 수자원과 전력 인프라, 그리고 도시 차원의 관리 체계에 의해 결정된다는 점을 현장에서 구체적으로 인식하는 계기가 되었다. 이러한 관찰을 바탕으로, 다음 절에서는 현지 전문가 인터뷰를 통해 이러한 구조가 실제 산업 운영에서 어떻게 작동하는지를 보다 구체적으로 살펴보고자 한다.

2) Marisol Cira

Marisol Cira 박사가 하고 계신 연구는 반도체 클러스터를 대상으로 하나, 반도체 공정 기술 자체를 분석하는 데 목적이 있지 않다. 오히려 반도체 제조 공정이 요구하는 막대한 에너지와 초순수(UPW) 수요를 어떠한 인프라 시스템이 감당하고 있는가, 그리고 그 시스템이 장기적으로 지속가능한가라는 질문에서 출발한다. 반도체 클러스터를 단순한 생산 시설의 집합이 아닌, 에너지와 수자원이 지속적으로 투입·순환되는 복합 인프라 시스템으로 인식하고 본 탐사를 기획하였다.

이러한 문제의식을 바탕으로, 본 팀은 반도체 산업 내부의 공정 설계나 장비 기술 중심 논의만으로는 초순수 재이용과 같은 수자원 문제를 충분히 이해하는 데 한계가 있다고 판단하였다. 특히 반도체 클러스터에서 요구되는 수자원 재이용은 공정 외부에 위치한 하·폐수 처리 및 재이용 시스템의 구조와 운영 방식에 의해 실질적으로 좌우되므로, 해당 분야의 전문 연구자를 직접 만나 현장의 관점에서

논의할 필요성이 제기되었다.

미국 USC Adam Smith 연구그룹을 방문하여, 하·폐수 재이용 및 고도 수처리 공정을 연구해 온 Dr. Marisol Cira와의 면담을 진행하였다. Dr. Cira는 막 생물반응기(MBR) 및 혐기성 막 생물반응기(AnMBR)를 중심으로, 실험실 규모를 넘어 실제 운전 조건에서의 공정 안정성, 유지관리, 에너지 소비, 막 오염 문제 등을 종합적으로 다루어 온 연구자이다. 이러한 연구 배경은 반도체 클러스터 차원의 수자원 재이용 전략을 검토하고자 한 본 팀의 탐사 목적과 직접적으로 맞닿아 있다.

현장 면담을 통해 본 팀이 확인한 가장 중요한 사항은, 초순수 재이용 과정에서 직면하는 문제들이 단순히 처리 효율이나 제거율로 설명될 수 없다는 점이었다. 재이용수 내 잔존 미생물, biofouling 발생 가능성, 막 수명 저하, 에너지 소비 증가는 각각 분리된 문제가 아니라, 실제 운전 환경에서는 하나의 시스템 안에서 서로 영향을 주고받으며 누적·증폭될 수 있는 요소로 작용한다는 점이 강조되었다. 이는 반도체 클러스터의 수자원 재이용 시스템이 기술 성능 중심의 접근만으로는 장기적인 안정성을 확보하기 어렵다는 현실을 보여준다.

Marisol Cira 박사님과 인터뷰는 고도 수처리 기술의 존재 여부를 확인하는 차원을 넘어, 해당 기술이 실제 반도체 클러스터 환경에서 어떤 조건 하에서 작동하며, 어떤 구조적 한계에 직면하게 되는지를 현장 연구자의 시각을 통해 점검한 과정이었다. 본 팀은 이를 통해 반도체 클러스터 수자원 재이용 논의가 개별 기술 도입의 문제가 아니라, 공정 구성과 운영 철학을 포함한 시스템 설계의 문제임을 보다 분명히 인식하게 되었다.

3) Golwala

Golwala 박사와의 인터뷰가 갖는 가장 큰 의의는, 반도체 클러스터의 수자원 문제를 단순히 “고순도 공정수 확보” 라는 기술적 목표로 한정하지 않고, 수처리 공정 자체를 에너지·자원 순환 인프라로 재해석할 수 있는 시각을 제공했다는 점에 있다. 이는 기존 반도체 수자원 논의에서 주로 후단 공정(RO, AOP, UPW 시스템)의 정밀도와 안정성에 초점이 맞추어져 왔던 접근과 대비되는 관점으로, 수처리 시스템을 클러스터 운영의 부속 설비가 아닌 핵심 기반 인프라로 인식하게 만드는 중요한 전환점을 제공하였다.

특히 Dr. Golwala의 연구는 실험실 차원의 개념 검증에 머무르지 않고, 실제 운전이 가능한 파일럿 규모 시스템을 기반으로 수행되고 있다는 점에서 현장 적용 가능성에 대한 신뢰도를 높여준다. AnMBR 공정의 에너지 회수 성능, 막 오염 거동, 그리고 수백 일에 달하는 장기 운전 안정성에 대한 말씀은, 반도체 제조시설이나 클러스터 단위 수자원 재이용 시스템을 설계할 때 필연적으로 직면하게 되는 현실적 제약 조건과 직접적으로 연결되어 있다. 이는 단기 성능 지표 중심의 기술 논의가 아니라, 장기 운영과 유지관리까지 고려한 시스템 관점의 접근이 필요함을 시사한다.

또한 이번 인터뷰를 통해, 반도체 산업 내에서 상대적으로 주목받지 못했던 전처리 공정의 전략적 중요성이 명확히 부각되었다. 일반적으로 초순수(UPW) 생산 논의는 후단 고도 정수 공정의 정밀 제어와 품질 관리에 집중되는 경향이 있으나, Golwala 박사는 전처리 단계에서의 수질 안정성과 공정 균질성이 후단 공정의 에너지 소비, 막 오염, 운영 안정성에 결정적인 영향을 미친다는 점을 강조하였다. 이는 전처리 공정을 단순한 보조 단계가 아니라, 전체 수자원 재이용 시스템의 성능을 좌우하는 핵심 단계로 재인식해야 함을 의미한다.

더 나아가 AnMBR과 같은 저에너지·고회수 전처리 기술은, 개별 펌 수준을 넘어 클러스터 단위 수자원 재이용 시스템 구성 가능성을 검토하는 데 있어 중요한 시사점을 제공한다. 대규모 클러스터에서는 공정 간 수질 요구 수준이 상이하고, 개별 설비를 중복 구축하는 데 따른 비효율성이 발생할 수밖에 없다. 이러한 상황에서 AnMBR 기반 전처리 시스템은 처리 용량의 유연성, 에너지 효율성, 장기 운전 안정성 측면에서 중앙 집중형 수자원 관리 모델의 핵심 구성 요소로 작용할 수 있음을 보여준다.

종합적으로 볼 때, Golwala 박사와의 인터뷰는 반도체 클러스터 수자원 재이용 논의를 ‘얼마나 깨끗한 물을 만들 것인가’ 라는 질문에서 ‘어떤 구조의 인프라를 설계할 것인가’ 라는 보다 상위의 질문으로 확장시키는 계기가 되었다. 이는 향후 용인 반도체 클러스터와 같은 대규모 산업 단지에서 수자원과 에너지 문제를 통합적으로 접근하는 데 있어 중요한 개념적 토대를 제공하며, 본 연구가 단순한 기술 비교를 넘어 클러스터 차원의 지속가능 전략을 모색하는 데 기여할 수 있음을 보여준다.

4) UCLA 이상석 박사

해당 인터뷰는 미국 반도체 클러스터의 지속적인 확장 과정에서 심화되고 있는 에너지 및 수자원 부담 문제를 구조적으로 이해하고, 이를 국내 반도체 클러스터 정책 설계에 적용 가능한 시사점으로 확장하기 위해 수행되었다. 특히 반도체 공정의 미세화와 함께 초순수 사용량이 급격히 증가하는 상황에서, 폐수 재활용 기술이 단순한 물 절감 수단을 넘어 공정 안정성과 산업 경쟁력을 좌우하는 핵심 인프라로 전환되고 있다는 점을 핵심 문제의식으로 설정하였다.

이러한 문제의식 하에, UCLA에서 멤브레인 기반 수처리 공정과 프로세스·시스템 엔지니어링 연구를 수행 중인 이상석 박사와의 인터뷰를 진행하였다. 해당 연구는 반도체 폐수가 CMP 공정의 나노 입자, 식각·도금 공정의 금속 이온, 포토 및 세정 공정의 유기물 등 복합 오염물로 구성되어 있으며, 이러한 폐수를 기존의 생물학적 처리-UF-RO 공정 체계로 안정적으로 재이용하는 데 구조적 한계가 존재한다는 점을 전제로 하고 있다.

탐사 결과, 이상석 박사는 반도체 폐수 재활용 공정의 핵심 병목이 특정 멤브레인 성능 부족이 아니라, 공정 간 연계 구조와 장기 운전 조건에서 발생한다는 점을 반복적으로 강조하였다. 난분해성 유기물 처리 한계, RO 공정에서의 미량 불순물 제거율 저하, ZLD 달성을 위한 결정화 단계의 에너지 부담은 모두 UF-RO-결정화 공정이 분절적으로 설계·운영될 때 심화되는 문제로, 개별 기술 개선만으로는 해결이 어렵다는 점이 확인되었다.

또한 반도체 공정의 극단적 미세화로 인해 요소 및 질소계 미량 물질과 같은 응스트롬 단위 불순물이 새로운 수질 관리 이슈로 부상하고 있음에도 불구하고, 현재 상용 RO 공정의 제거 성능은 이에 충분히 대응하지 못하고 있다는 점이 지적되었다. 이는 향후 UPW 재활용 정책과 수질 기준이 기존의 입자·이온 중심 관리에서 벗어나, 보다 미세한 불순물까지 고려하는 방향으로 재정립될 필요가 있음을 시사한다.

아울러 UF 멤브레인 운전 측면에서는 평균 기공 크기보다 기공 구조의 불균일성이 최종 UPW 수질과 장기 운전 안정성에 더 큰 영향을 미친다는 점이 강조되었으며, CMP 폐수와 같이 나노 입자가 포함된 시스템에서는 투과량보다 분리 안

정성이 핵심 성능 지표로 작용함이 확인되었다. 이는 반도체 수자원 정책이 단기 처리 용량 확대보다는, 장기 운전 안정성과 공정 불량 리스크 최소화를 중심으로 재설계되어야 함을 의미한다.

종합하면, 본 인터뷰는 반도체 수자원 재활용 문제를 개별 공정 기술의 성능 한계가 아닌, 시스템 설계·운영·정책 구조의 문제로 재정의하게 만든다는 점에서 중요한 의미를 지닌다. 이는 이후 정리된 Q&A와 정책적 제언이 기술 나열이 아닌, 반도체 클러스터 차원의 수자원 인프라 전략으로 확장될 수 있는 논리적 기반을 제공한다는 점에서 본 해외 탐사의 핵심 성과로 평가할 수 있다.

5) Dr. Binglin Guo

이번 USC Dr. Binglin Guo 인터뷰의 가장 큰 의의는, 반도체 공정수 재이용 문제를 기존의 ‘회수율 향상’이나 ‘개별 처리 기술의 성능 개선’이라는 기술 중심 프레임에서 벗어나, 한계 오염물질이 전체 시스템을 어떻게 규정하는가라는 구조적 관점에서 재조명하게 만들었다는 점에 있다. 특히 PFAS를 중심으로 한 논의는, 반도체 수자원 재이용이 더 이상 단순한 공정 최적화 문제가 아니라 에너지 소비, 공정 안정성, 분석 인프라, 2차 폐기물 관리가 얽힌 복합 인프라 문제임을 분명히 드러냈다.

인터뷰에서 강조된 PFAS의 화학적 안정성과 구조적 다양성은, 현재 반도체 산업에서 적용 중인 고도 정수 및 재이용 공정이 갖는 근본적 한계를 명확히 보여준다. RO 및 고도 처리 이후에도 잔존 가능한 PFAS의 특성은, 재이용률을 높이는 것만으로는 UPW 품질 리스크를 해소할 수 없음을 시사한다. 이는 반도체 수자원 정책이 양적 회수율 목표만을 설정할 경우, 장기적으로 공정 리스크와 에너지 부담을 동시에 확대할 수 있음을 실증적으로 뒷받침하는 근거라 할 수 있다.

또한 이번 탐사는 실험실 수준에서 보고되는 PFAS 제거 기술 성과와 실제 반도체 Fab 적용 사이에 존재하는 간극을 구체적으로 드러냈다는 점에서 중요한 의미를 갖는다. 반도체 폐수 특유의 고이온강도와 복합 오염물질 조건은 활성종 소거를 통해 분해 효율을 급격히 저하시킬 수 있으며, 고에너지 분해 공정의 대규모 적용은 경제성과 지속가능성 측면에서 심각한 제약을 야기한다. 이는 PFAS 제거 기술을 단기간에 전면 적용하기보다는, 파일럿 규모 실증과 장기 운전 데이터를

통해 시스템 차원의 영향을 검증하는 접근이 필수적임을 시사한다.

더 나아가, PFAS 제거 성능을 평가하는 분석 인프라 자체가 기술 적용의 병목으로 작용하고 있다는 점도 이번 인터뷰를 통해 분명히 드러났다. 검출 한계와 표준물질의 제약으로 인해 ‘완전 제거’ 여부를 명확히 판단하기 어려운 현실은, 기술 개발과 정책 적용 사이에 구조적인 불일치를 초래한다. 이는 향후 반도체 공정수 재이용 정책이 기술 성능 기준뿐 아니라 분석 가능성과 검증 체계를 함께 고려해야 함을 의미한다.

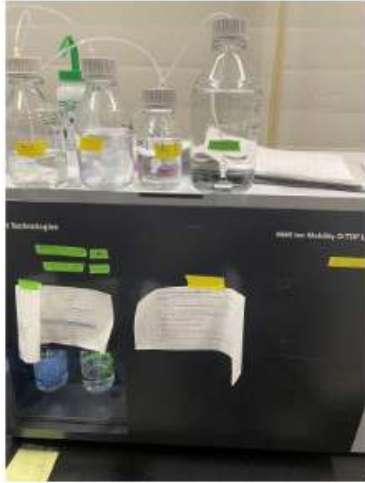
종합하면, 이번 USC 탐사는 PFAS 문제를 개별 오염물질 제거 차원이 아닌, 반도체 클러스터 수자원 인프라의 설계 철학과 정책 목표 자체를 재검토하게 만드는 계기를 제공했다는 점에서 의미가 크다. PFAS를 어떻게 관리하느냐에 따라 공정수 재이용의 한계, 에너지 투입 수준, 그리고 반도체 클러스터의 장기 지속가능성이 결정될 수 있다는 점에서, 본 인터뷰는 이후 정책 제언과 미연구 영역 도출의 핵심 출발점으로 기능한다.

기기 및 장비

(1) **Lc/MS**: 액체 크로마토그래피(LC)로 시료 내 성분을 먼저 분리한 뒤, 질량분석기(MS)를 통해 각 성분의 분자량과 구조 정보를 분석하는 장비이다. 막 시스템(MS) 실험 결과를 최종적으로 검증하는 역할을 한다. / 사진 상단에 연결된 여러 병은 LC 이동상 및 MS 이온화 보조 용액이다. 막 분리 실험용 소형 막 시스템(Membrane System)은 flux 변화, 오염(fouling), 장시간 안정성, 재이용수 수질 변화를 보기 위해 사용된다.

(2) 하단의 4개 사진을 기준으로 장비 특성을 비교하면,

좌측 두 사진에 제시된 장비는 **세라믹 기반 고체 필터(세라믹 필터 모듈)**로, 다공성 세라믹 소재를 이용해 물리적 여과를 수행하는 수처리 장치이다. 세라믹 필터는 실리카 기반의 무기질 소재를 고온 소결하여 제작되며, 내부에 균일한 미세 기공을 형성하고 있어 탁도 유발 입자, 부유 고형물, 미생물 등을 효과적으로 제거할 수 있다. 고체 구조를 가지기 때문에 화학적 안정성과 내구성이 뛰어나고, 고압·고온 조건에서도 물성 변화가 적다는 장점이 있다. 또한 역세(backwashing)나 물리적 세정이 가능해 반복 사용이 가능하며, 장기 운전이 요구되는 수처리 공



정에서 전처리용 필터 또는 미세입자 제거 단계에 주로 활용된다.

우측 두 사진에 제시된 장비는 막 원단(membrane sheet)으로, 고분자 기반 분리막을 시트 형태로 제조한 뒤 롤 형태로 보관한 상태이다. 해당 막 원단은 이후 스파이럴 와운드(spinal-wound) 모듈이나 플랫시트 모듈로 가공되어 실제 수처리 공정에 적용된다. 막 재질은 폴리아미드, 폴리설폰, PVDF 등과 같은 고분자 소재가 주로 사용되며, 기공 크기 및 구조에 따라 RO, NF, UF, MF 등 다양한 분리 공정에 활용된다. 막 원단은 용존 이온, 유기물, 미생물 등을 선택적으로 분리할 수 있어 정밀 수처리 및 재이용 공정에서 핵심적인 역할을 하며, 세라믹 필터와 달리 물질의 화학적 특성과 크기 차이를 이용한 선택적 분리가 가능하다는 특징을 가진다.



(3) **Gas chromatography:** 시료를 기체 상태로 만들어 컬럼(column)을 통과시키면서 성분별로 분리하고, 검출기를 통해 각 성분의 농도를 분석하는 장비 / 사진 상단의 세로로 긴 구조물은 자동 시료 주입기이다. 다수의 바이알에 담긴 시료를 순차적으로 주입하며 주입량을 μL 단위로 정밀 제어하고 분석자 개입 없이 장시간 연속 분석이 가능하다. 자동 시료 주입을 통해 고정밀 반복 분석이 가능한 연구용 분석 장비이다. 시료 간 편차를 줄이고, 정량 분석의 신뢰도를 높이는 데 핵심적인 역할을 한다.



(4) **liquid chromatography:** 액체 이동상을 이용해 시료 성분을 컬럼에서 분리하고, 검출기를 통해 각 성분을 정성·정량 분석하는 장비, GC와 달리 시료를 기화시킬 필요가 없어 비휘발성, 열에 민감한 물질 분석에 적합하다. 사진 속 장비는 모듈형으로 구성된 HPLC/UHPLC 시스템으로, 장시간 연속 분석과 고분해능 분리가 가능하다. 상단에 여러 개의 유리병이 연결되어 있는데, 이는 이동상 저장용이다.

(5) **Iron chromatography:** 철($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$)과 같은 금속 이온을 선택적으로 분리 정량하기 위한 이온 크로마토그래피 또는 금속 특화 LC 시스템으로, 상단에 연결된 반투명 병들은 용리액(eluent) 또는 시약(reagent) 저장용이다. 철 이온의 분리



및 검출을 위한 특수 조성 용액이며, 산성 조건 또는 킬레이트 기반 용리액 사용 가능하며 철의 산화 상태(Fe^{2+} / Fe^{3+})를 안정화하기 위한 시약 포함이 가능하다.



(6) 자동 고체상 추출(Solid Phase Extraction, SPE) 기반의 이온/금속 분석용 전처리 분리 시스템: 이 장비는 시료에 포함된 특정 성분을 선택적으로 분리·농축하기 위해 설계된 분석 전처리 장치로, 주로 LC, LC/MS, ICP 분석 이전 단계에서 사용된다. 일반적인 크로마토그래피 장비가 성분을 직접 분리·검출하는 데 목적이 있다면, 이 시스템은 복잡한 수질 시료로부터 분석 대상 성분만을 효과적으로 추출하여 후단 분석의 정확도를 높이는 역할을 수행한다.

장비 전면에 배열된 여러 개의 소형 컬럼은 SPE 카트리지로, 내부에는 금속 이온이나 특정 화학종에 선택성을 갖는 흡착제가 충전되어 있다. 시료가 이 컬럼을

통과하면서 목표 성분은 고체상에 선택적으로 흡착되고, 염류나 불필요한 매트릭스 성분은 제거된다. 이후 산성 또는 킬레이트 기반의 용출 용액을 사용해 흡착된 성분을 소량의 용액으로 회수함으로써, 극미량 성분을 효과적으로 농축할 수 있다. 여러 컬럼을 동시에 운전할 수 있어 병렬 실험이나 조건 비교 분석이 가능하다는 점도 이 장비의 중요한 특징이다.



(7) 실험실 규모의 연속식 생물반응기 시스템: 여러 개의 반응조를 병렬로 구성하여, 미생물 반응이 수반되는 수처리 공정을 장시간 연속 운전 조건에서 모사·비교하기 위해 사용된다. 각 반응조는 밀폐된 원통형 용기로 구성되어 있으며, 내부에는 실제 공정수를 모사한 혼합액이 채워져 있고, 상부에는 교반·주입·배출을 위한 다수의 포트와 센서가 연결되어 있다.

각 반응조 상단에는 정량 펌프와 연결여된 유입 유출 라인이 설치되어 있어, 유량과 체류시간을 정밀하게 제어할 수 있다. 이를 통해 동일한 조건에서 여러 반응조를 동시에 운전하거나, 반응조별로 서로 다른 운전 조건(유기물 농도, 미생물 부하, 주입 속도 등)을 적용해 비교 실험을 수행할 수 있다. 또한 반응조 내부에는 교반기 및 가스 주입 배출 라인이 연결되어 있어, 산소 공급 여부에 따라 호기성 또는 혐기성 조건을 선택적으로 구현할 수 있다.

6) Arizona State University Amin Mojiri 교수님

이번 해외 탐사를 통해 확인한 바에 따르면, 반도체 산업에서의 수자원 문제는

단순한 폐수 처리나 재이용 기술의 문제가 아니라, 수자원의 흐름을 어디까지 관리 대상으로 포함할 것인가에 대한 구조적 정의의 문제에 가깝다. 특히 반도체 제조 공정과 대형 산업 시설에서는 액상 폐수뿐 아니라, 냉각 및 공정 과정에서 발생하는 수증기 형태의 수자원 손실이 지속적으로 발생하고 있음에도 불구하고, 이는 기존 수처리 인프라의 관리 범위에 포함되지 않는 경우가 많다.

AWH(Atmospheric Water Harvesting) 관련 연구와 현장 논의를 통해, 이러한 비가시적 수자원 손실 역시 회수 가능성이 있는 연구 대상으로 접근되고 있음을 확인할 수 있었다. 탐사 과정에서 특히 인상 깊었던 점은, 이러한 AWH 기술이 독립적인 수자원 공급 기술로 논의되기보다는, 기존 수자원 관리 체계에서 포착되지 않던 손실 경로를 보완적으로 이해하기 위한 연구 대상으로 다뤄지고 있다는 점이었다. 특히 반도체 제조 시설과 같이 초고순도수(UPW)에 대한 요구 수준이 매우 높은 환경에서는, 수질 안정성과 재이용 가능성이 무엇보다 중요하며, 이로 인해 수자원 인프라는 방류 중심이 아닌 재이용 중심으로 설계된다.

인터뷰를 통해 확인한 바와 같이, 반도체 수자원 인프라는 일반적인 도시 또는 산업 수처리 시스템과 근본적으로 다르다. 반도체 팹에서는 극히 미량의 불순물 변화도 공정 수율에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 초고순도수의 품질 안정성이 핵심 요구 조건으로 작용한다. 또한 발생하는 폐수는 공정 화학물질, 용매류, 휘발성 유기화합물(VOCs) 등으로 구성된 복잡하고 변동성이 큰 조성을 가지며, 단일 처리 공정으로는 안정적인 처리가 어렵다. 이로 인해 UF, RO, ion exchange, AOP와 같은 고도 처리 공정이 복합적으로 결합된 수처리 시스템이 필요하다.

아울러 탐사를 통해, 반도체 수처리에서는 개별 처리 기술의 성능뿐 아니라 오염원 분리(source separation)가 시스템 전체의 효율과 안정성을 좌우하는 핵심 요소를 확인할 수 있었다. 서로 다른 화학적 성상을 가진 폐수를 발생 단계에서부터 분리하지 않을 경우, 수처리 시스템은 가장 처리 난이도가 높은 오염물 기준으로 과도하게 설계될 수밖에 없으며, 이는 에너지 소비와 운영 부담을 크게 증가시킨다. 반대로 공정별·화학군별·재이용 목적별 분리가 이루어질 경우, 각 스트림에 적합한 처리 공정을 선택적으로 적용할 수 있어 재이용률과 시스템 안정성이 동시에 향상된다.

종합하면, 이번 해외 탐사는 반도체 수자원 문제를 개별 기술이나 장치의 문제

가 아니라, 수자원 흐름 전반을 어떻게 정의하고, 어디까지 관리 대상으로 포함할 것인가에 대한 인프라 설계 문제로 재인식하는 계기가 되었다. AWH 연구는 이러한 관점에서 기존 수자원 관리 체계의 사각지대를 보완할 수 있는 연구적 접근으로 이해될 수 있으며, 향후 반도체 클러스터 단위의 수자원 정책과 인프라 설계에 있어 참고 가능한 시사점을 제공한다.

기기 및 장비

(1) AirJoule 기계 - desiccant(MOF) - based AWH system



본 장비는 AirJoule에서 개발한 MOF 기반 AWH 시스템으로, MOF 기반 흡습제를 사용한 AWH 파일럿 시스템이다. 구체적으로, 공기 중에 포함된 수증기를 흡습 물질에 흡착한 뒤, 열을 가해 탈착시키고 응축 과정을 통해 물을 회수하는 구조를 가진다. 본 시스템은 저습 환경에서도 작동 가능한 흡습제 기반 AWH 장비이다. 장비 전면에 설치된 팬은 공기를 시스템 내부로 유입시키는 역할을 하며, 냉각을 위한 응축기 팬이 아닌, 흡착 단계에서의 공기 처리를 담당한다. 흡습제에 포집된 수분은 탈착 단계에서 열을 통해 수증기로 방출되며, 이후 별도의 응축 구간에서 액체 물로 회수된다. 이때, 탈착 과정에서 필요한 에너지원으로 외부 에너지뿐 아니라, 반도체 팹이나 데이터센터의 냉각 공정에서 발생하는 폐열을 연계하는 시스템이 지속적으로 연구되고 있다. 해당 장비는 트레일러에 탑재된 이동형 시스템으

로, 이동이 가능하기 때문에 운전 조건에 따라 하루 수백 갤런 규모의 물 생산이 가능하나, 이는 운전 환경과 설정에 따라 달라질 수 있다.

(2) dew-point condensation 기반 산업용 제습기

본 장비는 냉각 응축(dew-point condensation) 원리를 기반으로 하는 산업용 제습기형 AWH 시스템이다. 공기를 시스템 내부로 유입한 뒤, 냉각 코일을 통해 공기를 이슬점 이하로 냉각시켜 공기 중 수증기를 응축시키고, 응축된 물을 회수하는 구조를 가진다. 해당 방식은 일반적인 제습기 및 응축식 대기 수분 회수 장비와 동일한 작동 원리를 따른다. 냉각 응축 방식은 상대습도가 높은 환경에서 효과적으로 작동하며, 물 회수 효율이 높아지기에 본 장비는 고습 환경에서의 대기 수분 회수 특성을 확인하기 위한 장비이다.



(3) 산업용 냉각탑 기반 응축형 AWH 연구 설비

세부 장비 사진



전체 설비 사진



본 장비는 구조적으로는 산업용 냉각탑 또는 증발식 냉각 기반 대형 열·물 교환 설비의 형태를 가지며, AWH(Atmospheric Water Harvesting) 연구 맥락에서는 대규모 응축·증발 기반 AWH 테스트베드로 활용되고 있다. 본 설비는 대기 중에

존재하는 수분을 응축 과정을 통해 회수하는 방식을 적용하며, 실제 환경 조건 하에서 수분 회수 특성과 장시간 운전 안정성을 체계적으로 분석하기 위한 연구 인프라로 활용되고 있다.

해당 설비는 흡착형 AWH 시스템이 아닌 응축 기반 AWH 계열에 해당하며, 공기 중 수증기를 이슬점 이하 조건으로 유도하여 액체 상태의 물로 회수하는 메커니즘을 중심으로 운용된다. 연구 과정에서는 운전 조건(온도, 습도, 유량 등)의 변화에 따른 수분 회수량의 정량적 변화, 연속 운전 시 시스템 거동, 실제 환경에서의 적용 가능성 등을 종합적으로 평가하는 데 초점이 맞춰져 있다.

따라서 본 설비는 물을 상시적으로 생산하는 상용 장치라기보다는, TSMC 사에서 본 교수님의 연구실과 협업하여 응축 기반 수자원 포집 기술의 작동 특성과 실효성을 실제 규모에서 검증하고 분석하기 위한 연구용 설비로 이해할 수 있다.

iv. 해외 전문가 인터뷰

1. Intel Chandler Campus 김종수 엔지니어 면담

가. 면담 개요

- 면담 대상: 김종수 엔지니어 (Intel Chandler Campus, Process Integration 및 수율 분석)

- 면담 방식: 질의응답 인터뷰

- 자문 주제: 애리조나 반도체 클러스터의 수자원·전력 인프라 운영 구조 및 산업-도시 관계

나. 주요 면담 내용 및 분석

1) 공정 통합 및 수율 관리 역할

김종수 엔지니어는 Intel에서 Process Integration과 수율 분석을 주요 업무로 수행하고 있다. 공정 통합은 반도체 제조 공정 전반을 연결하고 조율하며, 공정 간 상호작용을 최적화하는 역할을 수행한다. 수율 분석은 공정 조건 변화가 최종 제품 수율에 미치는 영향을 분석하여 생산 효율을 개선하는 업무이다. 이는 단일 공정의 최적화가 아닌, 공정 전반의 상호 연계성을 고려한 통합적 관리 체계가 중요함을 보여준다.

2) 애리조나 피닉스의 수자원 구조와 재이용 체계

애리조나 피닉스는 사막 지역에 위치하여 자연 하천이 거의 없고, 수자원을 인근 산간 지역의 댐에서 장거리로 공급받는 구조를 갖는다. 공급된 물은 대규모 운하 시스템을 통해 도시 전역으로 분배되며, 사용 후에는 정화 과정을 거쳐 재이용된다. 재이용수는 도심 내 호수, 분수, 잔디 관개 등 음용수를 제외한 다양한 용도로 활용된다.

반도체 팹 역시 이러한 시 단위 수자원 관리 체계에 포함되어 있으며, 공급받은 물의 약 90% 이상을 사용 후 시에 반환한다. 반환된 물은 도시 차원에서 재처리되어 재이용되며, 팹 내부에서도 일부 순환 사용이 이루어진다. 재이용은 강제 규제보다는 반환하지 않은 물에 비용을 부과하는 경제적 유인 구조를 통해 유도된다.

3) 초순수 재이용의 기술적 한계

반도체 공정에서 사용된 물을 초순수(UPW) 수준까지 다시 재이용하는 데에는 기술적 한계가 존재한다. 사용 후 배출수에는 입자 및 다양한 화학물질이 포함되어 있어 동일 수준으로 재정제하기 어렵다. 이에 따라 초순수는 상대적으로 깨끗한 외부 원수를 정제하여 생산하며, 재이용수는 냉각수 등 다양한 등급의 용수로 활용된다. 이는 물을 용도별로 구분 관리하는 구조임을 보여준다.

4) 산업 유치 구조와 도시-산업 공생 관계

애리조나 주는 주(State) 단위에서 기업에 투자 유치를 제안하는 구조를 갖는다. 공급 가능한 물·전력 인프라를 근거로 반도체 팹 입지를 제안하며, 이를 통해 고용 창출과 지역 경제 활성화를 도모한다.

반도체 팹과 도시는 수자원 측면에서 공생 관계를 형성한다. 산업 유치로 인해 주민 생활에 문제가 발생할 경우 사회적 갈등이 확대될 수 있으나, 생활에 지장이 없고 고용이 창출될 경우 사회적 수용성이 확보된다. 이 과정에서 대학과 연구기관이 산업·도시와 협력하는 구조가 형성되어 있다.

5) 전력 공급 구조와 원자력 발전의 역할

애리조나 반도체 팹의 전력 공급은 원자력 발전을 중심으로 구성된다. 고온 환경으로 인해 냉방 설비를 24시간 가동해야 하므로, 기저부하를 안정적으로 담당할 수 있는 발전원이 필수적이다. 태양광 발전은 보조적 수단으로 활용된다.

원자력 발전에 대한 사회적 거부감은 한국에 비해 상대적으로 낮은 편이며, 이

는 지역적 조건과 인식의 차이와 관련된다. 다만 극한 기후 상황에서는 산업보다 시민의 전력 사용이 우선되며, 실제로 기후 리스크로 인해 반도체 팹이 장기간 가동을 중단한 사례도 존재한다. 이는 반도체 산업에서 전력 공급의 안정성과 우선 순위 확보가 핵심임을 보여준다.

6) 공정 전력 소비 구조와 클러스터 중앙화

반도체 공정의 전력 소비는 특정 단일 공정보다 장비 수와 24시간 상시 가동 구조에 의해 누적적으로 결정되는 경향이 크다. 장비 재가동 과정의 에너지 부담으로 인해 무리한 셧다운은 비효율적일 수 있다.

애리조나 클러스터에서는 전력·물·화학물질 인프라가 중앙 집중형으로 관리되며, 실시간 모니터링과 표준화된 대응 계획을 기반으로 운영된다. 다만 인프라 조건을 의도적으로 낮추는 방식의 최적화는 품질 리스크로 인해 현실적으로 어렵다.

7) 물-에너지 트레이드오프에 대한 대응

물 재이용률이 증가할수록 전력 소비가 증가할 수 있으나, 애리조나는 원자력 기반의 안정적 전력 인프라를 통해 이를 감당하고 있다. 다만 전력과 물은 지역 사회와 공동으로 사용하는 자원이므로, 산업 운영이 주민 생활에 영향을 주지 않도록 관리하는 것이 중요하다.

다. 소결 및 시사점

김중수 엔지니어와의 면담은 애리조나 반도체 클러스터가 재이용 중심의 수자원 관리 체계와 원자력 기반의 안정적 전력 인프라를 결합하여 운영되고 있음을 보여준다. 이는 고온·건조 환경이라는 제약 조건을 도시 차원의 제도 설계와 중앙 집중형 인프라 운영으로 극복한 사례라 할 수 있다.

특히 물 재이용을 경제적 유인 구조로 설계한 점, 기저부하 전원을 명확히 설정한 전력 전략, 그리고 클러스터 단위의 중앙화된 인프라 관리 체계는 용인 반도체 클러스터의 수자원·전력 전략 수립에 비교 사례로서 중요한 시사점을 제공한다.

2. USC Marisol Cira 박사 면담

가. 면담 개요

- 면담 대상: Marisol Cira 박사 (University of Southern California)

- 면담 방식: 질의응답 인터뷰
- 자문 주제: 반도체 클러스터 수자원 재이용 공정의 안정성 확보 및 물-에너지 최적화 전략

나. 주요 면담 내용 및 분석

1) UF 기반 전처리 공정에서의 Biofouling 관리 전략

Marisol Cira 박사는 UF 기반 전처리 공정에서 발생하는 biofouling 문제를 막 기술 자체의 성능 한계라기보다는, 공정을 어떻게 관리하고 운영하느냐의 문제로 규정하였다. 재이용수 내 잔존 미생물은 완전히 제거되어야 할 대상이라기보다, 특정 조건이 갖추어질 경우 급격한 biofilm 형성을 유발할 수 있는 잠재적 리스크로 이해해야 한다는 점을 강조하였다.

모니터링 측면에서는 미생물 농도나 탁도와 같은 단일 수질 지표만으로는 biofouling 발생을 사전에 예측하기 어렵다고 지적하였다. 대신 막 차압(transmembrane pressure), 유기물 부하 변화, 용존산소(DO) 농도 등 운영 지표 기반의 연속 모니터링이 필요하다고 강조하였다. 이러한 지표는 biofouling이 가시화되기 이전 단계에서 공정 이상을 감지할 수 있는 선행 신호로 작용한다.

전처리 전략과 관련해서는 UF 공정에 과도한 정화 역할을 기대하는 접근의 위험성을 지적하며, 다중 장벽(multi-barrier) 개념 하에서 상류 공정의 역할을 명확히 설정해야 한다고 설명하였다. 전단에서의 여과 및 UV 처리는 미생물의 활성을 저감시키고 DNA를 손상시켜 막 표면에서의 증식 가능성을 근본적으로 낮출 수 있다. 이는 biofouling 문제를 사후 세정 중심 대응이 아닌, 예방적 운영 관리 차원에서 접근해야 함을 시사한다.

2) 물-에너지 넥서스 최적화와 공정 구조의 재설계

수자원 재이용률을 높일수록 에너지 소비가 증가한다는 일반적 인식에 대해, Cira 박사는 이러한 전제를 재검토할 필요가 있다고 언급하였다. 특히 혐기성 막 생물반응기(AnMBR)를 사례로 제시하며, 공정 선택에 따라 물 재이용과 에너지 소비 간 관계가 달라질 수 있음을 강조하였다.

AnMBR 공정은 폭기(aeration)가 필요하지 않아 기존 호기성 공정 대비 에너지 소비를 크게 줄일 수 있으며, 유기물 분해 과정에서 생성되는 바이오가스를 에너지로 회수할 수 있다. 이는 수자원 재이용 공정이 반드시 에너지 소비 증가로 이

어진다는 인식이 공정 구조에 따라 달라질 수 있음을 보여준다.

또한 클러스터 단위의 물-에너지 최적화는 개별 설비의 효율 개선이 아니라, 공정 구조의 단순화와 통합 설계에서 출발해야 한다고 강조하였다. 다단계 처리 공정을 통합 공정으로 축소할 수 있다면, 에너지 소비뿐 아니라 운영 복잡성과 유지 관리 비용 역시 함께 감소할 수 있다. 이는 기술 추가 중심 접근이 아닌 시스템 재구성 중심 전략의 필요성을 제기한다.

다. 소결 및 시사점

Marisol Cira 박사와의 면담은 반도체 클러스터의 수자원 재이용 공정이 단순한 기술 성능 문제가 아니라, 운영 관리와 공정 설계 전략의 문제임을 보여준다. 특히 biofouling 문제를 예방적 관리 체계로 접근해야 한다는 점과, 물-에너지 트레이드오프를 구조적으로 재해석해야 한다는 점은 클러스터 단위 수자원 전략 수립에 중요한 시사점을 제공한다.

이는 수자원 재이용 확대를 단순히 고도 처리 기술의 추가로 해결하려는 접근에서 벗어나, 다중 장벽 설계와 통합 공정 구조 재설계를 병행해야 함을 시사한다. 나아가 물-에너지 최적화는 설비 효율 개선이 아니라 시스템 구조의 재편이라는 관점에서 접근되어야 함을 확인하였다.

3. USC Golwala 박사 면담

가. 면담 개요

- 면담 대상: Golwala 박사 (University of Southern California)
- 면담 방식: 질의응답 인터뷰
- 자문 주제: Anaerobic Membrane Bioreactor(AnMBR)의 수자원 재이용 적용 가능성과 에너지-성능 최적화 전략

나. 주요 면담 내용 및 분석

1) AnMBR 공정의 핵심 성능 지표

Golwala 박사는 AnMBR 공정을 수자원 재이용 관점에서 평가할 때, 단순한 방류수 수질이나 제거 효율만으로는 충분하지 않다고 지적하였다. 공정의 실질적 성능을 판단하기 위해서는 유기물 분해의 안정성과 장기 운전 지속 가능성을 동시에 보여주는 지표가 중요하다고 설명하였다.

첫 번째 핵심 지표는 바이오가스 생산량이다. AnMBR은 혐기성 조건에서 유기물을 분해하는 과정에서 메탄을 포함한 바이오가스를 생성하며, 이는 유기물 제거 효율을 반영하는 동시에 에너지 회수 잠재력을 나타내는 지표로 작용한다. 바이오가스 생산량이 안정적으로 유지된다는 것은 시스템 내부의 생물학적 반응이 정상적으로 이루어지고 있음을 의미한다.

두 번째 핵심 지표는 막 양단 압력차(transmembrane pressure, TMP)이다. AnMBR은 고형물 체류 시간이 길어 미생물과 고형물이 지속적으로 축적되는 구조를 갖는다. 이는 공정 안정성 측면에서 장점이 될 수 있으나, 막 오염이 누적될 경우 에너지 소비 증가와 유지관리 비용 상승으로 이어질 수 있다. 따라서 TMP는 단순한 운전 지표를 넘어, 장기적 적용 가능성을 판단하는 핵심 지표로 기능한다.

2) 에너지 효율과 수처리 성능의 통합 설계

AnMBR은 기존 호기성 공정과 달리 폭기(aeration)가 필요 없다는 구조적 특징을 갖는다. 이는 수처리 시스템 전체의 에너지 소비 구조를 근본적으로 변화시키는 요소이다. 물론 막 공정이 추가되면서 펌핑, 세정, 압력 유지 등에 따른 에너지 소모가 발생하지만, 이를 단순한 에너지 부담 증가로 해석해서는 안 된다고 강조하였다.

설계 단계에서 중요한 것은 막 공정이 과도한 에너지 소비 요인이 되지 않도록 운전 조건을 최적화하는 전략이다. 고형물 농도 관리, 막 플럭스 설정, 역세 및 세정 주기 조정은 단순한 운영 변수라기보다 에너지 효율을 좌우하는 설계 변수로 인식되어야 한다.

또한 혐기성 공정에서 생성되는 바이오가스를 cogeneration이나 자체 전력 공급원으로 활용할 경우, 막 공정에서 소비되는 에너지를 상당 부분 상쇄할 수 있다. 이 경우 AnMBR은 고도 수처리 공정임에도 불구하고, 시스템 전체로는 에너지 자립 또는 준자립 구조를 형성할 가능성을 갖는다.

다. 소결 및 시사점

Golwala 박사와의 면담은 AnMBR 공정이 단순한 고도 수처리 기술이 아니라, 에너지 회수와 장기 운전 안정성을 동시에 고려해야 하는 통합 시스템임을 보여준다. 특히 바이오가스 생산과 막 오염 관리(TMP)의 균형이 무너질 경우 재이용 공정으로서의 실효성이 크게 저하될 수 있다는 점이 강조되었다.

이는 수자원 재이용 공정 설계 시 에너지 효율과 수처리 성능을 상충 관계로 단순화하기보다, 통합 설계를 통해 동시에 최적화해야 함을 시사한다. 반도체 클러스터의 물-에너지 전략 역시 개별 기술의 성능 개선이 아니라, 공정 구조와 에너지 회수 체계를 결합한 시스템 관점에서 접근되어야 한다는 점을 확인하였다.

4. UCLA 이상석 박사 면담

가. 면담 개요

- 면담 대상: 이상석 박사 (University of California, Los Angeles)
- 면담 방식: 질의응답 인터뷰
- 자문 주제: 반도체 공정 폐수 재이용의 기술적 병목과 멤브레인 기반 고도 수처리 전략

나. 주요 면담 내용 및 분석

1) 폐수 재활용 공정의 핵심 병목: 난분해성 유기물

반도체 공정에서 초고순도수(UPW) 사용량이 증가함에 따라 폐수 재활용 공정의 안정성이 핵심 과제로 부상하고 있다. 이상석 박사는 그중 가장 큰 병목으로 난분해성 유기물 처리 단계를 지적하였다. 신규 포토레지스트 및 특수 화학물질의 독성으로 인해 기존 생물학적 처리 공정의 안정적 운전이 점차 어려워지고 있으며, 이는 재이용 공정 전반의 부담으로 작용한다.

2) 공정 집약화를 위한 멤브레인 개질 전략

난분해성 유기물 문제를 보완하기 위한 대안으로, RO 멤브레인 개질을 통해 오염물 제거와 공정 집약화를 동시에 달성하는 접근이 제시되었다. 멤브레인 성능을 향상시켜 전처리 부담을 완화하고 시스템 안정성을 확보하는 방식이다. 이는 단순히 공정을 추가하는 것이 아니라, 핵심 분리 공정의 성능을 강화하여 전체 시스템을 단순화하는 전략으로 이해된다.

3) 미세화에 따른 새로운 수질 관리 이슈

반도체 공정의 미세화가 심화됨에 따라 옹스트롬 단위 불순물 관리가 중요한 이슈로 부상하고 있다. 특히 요소(urea) 및 질소계 미량 물질과 같은 극미량 오염물의 제거가 핵심 과제로 지적되었다. 현재 RO 공정의 제거율은 약 50% 수준에 머물러 있어, 초고순도 요구 수준을 충족하기에는 한계가 존재한다. 이는 기존 공

정의 물리적 분리 한계와 직결되는 문제이다.

4) ZLD와 에너지 부담

ZLD(Zero Liquid Discharge) 달성을 위해 필수적인 증발 기반 결정화 공정은 과도한 에너지 소비를 수반한다. 이를 클러스터 규모로 확장할 경우 에너지 비용 부담이 매우 커질 수 있으며, 이는 물-에너지 트레이드오프 문제를 구조적으로 드러내는 사례라 할 수 있다.

5) UF 멤브레인 설계와 장기 운전 한계

UF 멤브레인 성능에서 중요한 요소는 평균 기공 크기보다 기공 구조의 불균일성이다. 일부 큰 공극을 통해 나노 입자가 유출될 경우 최종 UPW 수질이 급격히 악화될 수 있다. 또한 장기 운전 관점에서 가장 큰 제한 요인은 파울링이며, 파울링 발생 시점을 지연시키고 화학 세정 및 막 교체 주기를 연장하는 전략이 현실적 해법으로 제시되었다.

6) 분리 안정성과 디지털 기반 운영 전략

CMP 폐수와 같은 복합 오염 시스템에서는 투과량보다 분리 안정성(rejection)이 우선되어야 한다. 미량 불순물 유입으로 인한 불량률 증가는 막대한 경제적 손실로 이어질 수 있기 때문이다.

향후 클러스터 확장에서 핵심 변수로는 스마트 센서와 AI·머신러닝 기반의 파울링 예측 및 선제 대응 전략이 제시되었다. 디지털 트윈 기반 운영 전략은 장기 운전 안정성과 품질 관리의 핵심 도구로 작용할 수 있다.

다. 소결 및 시사점

이상석 박사와의 면담은 반도체 폐수 재이용 공정이 난분해성 유기물과 극미량 불순물 제거라는 구조적 한계에 직면해 있음을 보여준다. 특히 멤브레인 성능의 물리적 제약과 ZLD 공정의 에너지 부담은 기술적 확장의 한계를 동시에 드러낸다.

이는 반도체 클러스터의 수자원 전략이 단순한 처리 공정의 추가가 아니라, 멤브레인 개질, 분리 안정성 강화, 디지털 기반 예측 운영을 결합한 통합적 접근을 필요로 함을 시사한다. 또한 물 재이용 확대가 곧 에너지 부담 증가로 이어질 수 있다는 점에서, 수처리 기술과 에너지 전략을 병행 설계해야 한다는 과제를 확인하였다.

5. USC Binglin Guo 박사 면담

가. 면담 개요

- 면담 대상: Binglin Guo 박사 (University of Southern California)
- 면담 방식: 질의응답 인터뷰
- 자문 주제: 반도체 공정수 재이용 시스템에서 PFAS의 구조적 한계와 제거 기술의 적용 가능성

나. 주요 면담 내용 및 분석

1) PFAS의 화학적 안정성과 구조적 한계

Guo 박사는 PFAS가 반도체 공정수 재이용 시스템에서 핵심적인 한계 오염물질로 지적되는 이유를 그 화학적 구조적 안정성에서 찾았다. PFAS는 탄소-불소(C-F) 결합을 기반으로 하며, 이 결합은 약 488-544 kJ/mol 수준의 높은 결합 해리 에너지를 가진다. 이로 인해 일반적인 생물학적 처리나 화학적 산화·환원 공정으로는 분해가 거의 이루어지지 않는다.

RO 및 고도 정수 공정을 거치더라도 PFAS가 잔존할 가능성이 존재하며, 이는 초고순도수(UPW) 품질을 저해하는 미량 오염물질로 작용한다. PFAS 문제는 단순 제거 효율의 문제가 아니라, 재이용 시스템 전반의 신뢰성과 직결되는 구조적 제약으로 이해된다.

2) 화합물 다양성과 단일 기술 적용의 한계

PFAS는 단일 물질이 아니라 사슬 길이, 작용기, 전하 특성, 친·소수성 등이 서로 다른 수백~수천 종의 화합물군으로 구성된다. 또한 전구체 형태로 유입된 물질이 처리 과정에서 새로운 PFAS로 전환되기도 한다.

이러한 구조적·화학적 다양성으로 인해 단일 처리 기술로 모든 PFAS를 동시에 제거하는 것은 현실적으로 어렵다. 이는 특정 공정의 성능 개선만으로 문제를 해결하기 어려운 이유를 설명한다.

3) 고에너지 분해 기술의 경제성 한계

PFAS의 완전 무기화(mineralization)를 위해서는 자외선(UV), 전기화학 공정, 고급 산화·환원 공정 등 매우 높은 에너지를 요구하는 기술이 필요하다. 그러나 PFAS는 일반적으로 ng/L~µg/L 수준의 극미량 농도로 존재하기 때문에, 이러한 고

에너지 공정을 그대로 적용하는 것은 비효율적이다.

실제 적용을 위해서는 흡착이나 막 공정을 통한 사전 농축 과정이 필요하며, 이는 에너지 소비 증가와 공정 복잡성 확대라는 추가적 부담을 수반한다. 결과적으로 PFAS 제거는 기술적 가능성과 경제성 사이의 구조적 긴장을 내포한다.

4) 분석 기술의 한계와 불확실성

현재 PFAS 분석 기술은 검출 한계와 표준물질 확보 측면에서 제약이 존재한다. 일부 타겟 물질만 분석되는 경우가 많아, 실제로 존재하는 다양한 PFAS를 완전히 파악하기 어렵다.

반도체 UPW 시스템에서는 극미량 불순물도 문제가 될 수 있으나, 분석적 한계로 인해 “완전 제거” 여부를 명확히 판단하기 어렵다는 점이 중요한 제약으로 작용한다. 이는 기술적 제거 성능뿐 아니라 분석 신뢰성 문제까지 함께 고려해야 함을 의미한다.

5) 대규모 산업 시스템 확장 시의 제약

반도체 폐수는 고이온강도, 중금속, 유기용매 등 복합적 수질 특성을 가진다. 이로 인해 고급 산화·환원 공정에서 생성되는 활성종이 쉽게 소거되어, 실험실 조건 대비 분해 효율이 크게 저하될 수 있다.

또한 대규모 시스템에서 자외선, 전기, 열 기반 공정을 적용할 경우 에너지 소비가 급격히 증가하여 경제성과 장기 지속가능성 측면에서 한계를 드러낸다. 이는 실험실 기술과 산업 적용 사이의 간극을 보여준다.

6) 2차 폐기물과 환경적 리스크

흡착 및 막 여과와 같은 물리적 제거 기술은 PFAS가 농축된 2차 폐기물을 발생시킨다. 화학적 분해 공정 또한 불완전 반응 시 새로운 부산물이나 불소 이온 방출 등 2차 오염 가능성을 내포한다.

따라서 PFAS 제거는 단순 제거 효율 문제가 아니라, 2차 폐기물 관리와 환경적 리스크까지 포함한 종합적 관리 과제로 이해되어야 한다.

다. 소결 및 시사점

Binglin Guo 박사와의 면담은 PFAS가 반도체 공정수 재이용 시스템에서 단순히 “제거가 어려운 오염물질”이 아니라, 에너지 소비, 공정 복잡성, 분석 신뢰성, 2차 폐기물 관리까지 동시에 제약하는 구조적 한계 요인임을 보여준다.

이는 PFAS 문제를 개별 처리 기술의 성능 개선으로 해결하기보다, 공정 설계 단계에서의 발생 억제 전략, 농축-분해의 역할 분담, 에너지·자원 순환 관점의 통합 설계로 접근해야 함을 시사한다.

6. Arizona State University Amin Mojiri 교수 면담

가. 면담 개요

- 면담 대상: Amin Mojiri 교수 (Arizona State University)
- 면담 방식: 질의응답 인터뷰
- 자문 주제: Atmospheric Water Harvesting(AWH) 기술과 반도체 산업 수자원 관리의 확장 가능성, AI 기반 운영 전략

나. 주요 면담 내용 및 분석

1) AWH 기술의 원리와 적용 조건

Amin Mojiri 교수의 주요 연구 분야는 AWH(Atmospheric Water Harvesting)로, 대기 중 수분을 회수하여 물로 전환하는 기술이다. 이슬점 응축 방식은 공기를 이슬점 이하로 냉각하여 수증기를 응축시키는 원리로 작동하며, 상대습도 약 35% 이상 조건에서 효율적으로 작동한다. 그러나 저습 환경에서는 적용에 제약이 존재한다.

이를 보완하기 위해 교수는 흡습제 기반 AWH 시스템을 연구하고 있다. 해당 시스템은 흡습 물질이 공기 중 수증기를 흡착한 뒤, 탈착 과정을 통해 수분을 회수하는 구조이다. 연구는 흡착-탈착-응축의 연속 과정에서 수분 회수 특성을 분석하고, 다양한 환경 조건에서의 작동 메커니즘을 규명하는 데 초점을 둔다.

2) 반도체 수자원 관리와의 연관성

반도체 제조 공정에서는 대량의 초고순도수(UPW)가 사용되며, 일부 수분은 수증기 형태로 외부로 손실된다. 이러한 증발 손실은 기존의 액상 수처리 공정(RO, UF 등)의 관리 범위에 포함되지 않아 수자원 흐름을 정량적으로 파악하는 데 한계로 작용한다.

AWH 기술은 대기 중으로 손실된 수분을 다시 회수하는 접근을 가능하게 하며, 기존 수처리 공정에서 다루지 못했던 증발 손실을 수자원 관리 범주에 포함시킬 수 있는 확장적 전략으로 제시된다. 다만 회수 효율은 운전 조건과 환경 변수에

크게 좌우되며, 특히 흡습제 기반 시스템의 경우 흡착 및 탈착 단계의 최적화가 핵심 과제로 작용한다.

3) 반도체 수자원 인프라의 구조적 특성

Mojiri 교수는 반도체 제조 시설의 수자원 인프라가 일반 도시 또는 산업 시스템과 근본적으로 다르다고 설명하였다. 첫째, 초고순도수의 대량 사용과 극도로 안정적인 수질 유지가 요구된다. 미량 불순물의 존재도 수율과 신뢰성에 직접적인 영향을 미친다.

둘째, 일반 산업 폐수 처리 시스템이 법적 방류 기준 충족을 목표로 설계되는 반면, 반도체 수처리 시스템은 방류보다 재이용을 핵심 목표로 한다. 이는 담수 사용량을 줄이고 안정적 수자원 공급을 확보하기 위한 구조이다.

셋째, 반도체 폐수는 VOCs, 용매류, 다양한 공정 화학물질 등 복잡하고 변동성이 큰 오염물질을 포함한다. 이에 따라 UF, RO, 이온교환, 고급산화공정(AOP) 등 여러 고도 처리 기술을 결합한 복합 시스템이 필요하다. 또한 오염원 분리(source separation)를 통해 서로 다른 폐수 스트림을 구분 처리하는 전략이 효율성 측면에서 중요하다고 강조하였다.

4) 기존 수처리 기술의 한계와 복합 공정 필요성

단일 처리 기술만으로는 반도체 폐수를 안정적으로 처리하기 어렵다. 오염물 조성이 복잡하고 공정 조건에 따라 지속적으로 변하기 때문이다. 특히 초고순도수 품질의 일관성 유지가 매우 중요하므로, 강력한 실시간 모니터링 체계가 필수적이다.

이온교환, 자외선 처리, 오존 산화 등 서로 다른 특성을 가진 공정을 조합하여 적용해야 하며, 이는 기존 일반 산업 수처리 접근을 그대로 적용하기 어렵다는 점을 보여준다.

5) AI 기반 의사결정 지원의 가능성

AI와 머신러닝은 물과 에너지를 동시에 관리해야 하는 복합 시스템에서 의사결정을 지원하는 도구로 활용될 수 있다. 센서를 통해 수집된 대규모 데이터를 기반으로 패턴을 인식하고, 공정 내 이상 징후를 조기에 감지함으로써 운영자에게 유의미한 정보를 제공할 수 있다.

다만 AI가 운영자를 대체하기보다는, 의사결정을 지원하는 보조적 도구로 기능

하는 단계에 가깝다. 고품질 데이터 확보와 센서 인프라 구축이 전제 조건이며, AI는 운영자가 보다 안정적으로 품질을 유지하도록 돕는 역할을 수행한다.

다. 소결 및 시사점

Amin Mojiri 교수와의 면담은 반도체 수자원 관리가 기존 도시·산업 인프라와는 다른 초고순도 요구, 재이용 중심 설계, 복합 오염물 처리라는 구조적 특성을 지니고 있음을 보여준다. 또한 AWH 기술은 증발 손실까지 포함하는 확장적 수자원 관리 전략으로서 가능성을 제시한다.

특히 복합 공정 통합과 오염원 분리 전략, 그리고 AI 기반 실시간 모니터링은 향후 클러스터 단위 수자원 관리의 핵심 요소로 작용할 수 있다. 이는 수자원 전략이 단순 처리 기술의 개선을 넘어, 시스템 통합 설계와 데이터 기반 운영 체계로 전환되어야 함을 시사한다.

d. 본 탐사를 통해 도출된 전력 및 수자원 효율화 전략

i. 탐사의 의의

본 해외 탐사는 미국 반도체 클러스터를 대상으로, 에너지 및 수자원 효율화 문제를 개별 기술이나 단일 공정의 개선 차원이 아닌, 클러스터 단위 인프라 설계와 운영 철학의 문제로 재정의하는 것을 핵심 목표로 수행되었다. 이를 위해 본 연구팀은 반도체 제조 현장, 수처리 및 환경공학 연구, 미량오염물질 관리, 대기 수자원 회수(AWH) 연구를 아우르는 다양한 전문가들과의 인터뷰를 통해, 기술·운영·정책을 연결하는 다층적 관점을 확보하고자 하였다.

먼저 김종수 엔지니어(Intel Chandler Campus)와의 인터뷰는, 반도체 클러스터에서 전력 인프라가 단순한 비용 절감 대상이 아니라 무중단 운영과 공정 안정성을 보장하기 위한 절대적 전제 조건임을 명확히 보여주었다. 이는 반도체 산업의 에너지 문제가 개별 공정 효율 개선만으로는 해결될 수 없으며, 기저부하 전력원 확보, 송전망 구조, 위기 상황에서의 자원 배분 원칙과 같은 정책·제도적 설계가 공정 안정성을 좌우한다는 점을 인식하게 하는 출발점이 되었다.

이러한 인프라 관점의 문제의식은 수자원 분야로 확장되었다. Marisol Cira 박사(University of Southern California)와의 인터뷰를 통해, 반도체 클러스터의 수자원 재이용 문제가 고성능 수처리 기술의 존재 여부가 아니라 실제 운전 조건에서의

안정성, 유지관리 가능성, 장기 신뢰성에 의해 좌우된다는 점을 확인하였다. 이는 수자원 정책이 기술 도입 중심에서 벗어나, 파일럿 실증과 운영 데이터 축적을 전제로 한 인프라 정책으로 전환되어야 함을 시사하며, 수자원 재이용을 하나의 ‘설비’가 아닌 지속적으로 관리·운영되어야 하는 시스템으로 인식해야 함을 분명히 했다.

이러한 인식은 Harmita Golwala 박사와의 인터뷰를 통해 한 단계 더 확장되었다. Golwala 박사의 연구는 수처리 공정을 단순한 정화 과정이 아니라, 에너지 소비를 구조적으로 줄이고 자원 회수까지 고려할 수 있는 인프라 요소로 재해석할 수 있음을 보여주었다. 특히 AnMBR과 같은 저에너지 전처리 공정은, 반도체 클러스터 차원에서 수자원 재이용 확대가 반드시 에너지 부담 증가로 이어지는 것은 아니라는 점을 시사하며, 수처리 공정이 클러스터 운영의 ‘부속 설비’가 아닌 에너지·자원 순환 전략의 핵심 구성 요소로 재정의되어야 함을 보여주었다.

한편, 이상석 박사(University of California, Los Angeles)와의 인터뷰는 반도체 폐수 재활용 문제의 병목이 특정 공정이나 멤브레인의 성능 한계가 아니라, 공정 간 연계 구조와 장기 운전 조건에 있음을 명확히 드러냈다. 난분해성 유기물, 용스트롬 단위 미량 불순물, UF·RO 공정의 장기 안정성 문제는 모두 단기 성능 평가로는 포착되기 어려운 요소들로, 이는 반도체 클러스터 수자원 정책이 반드시 장기 운전 안정성과 시스템 리스크 관리를 기준으로 설계되어야 함을 시사한다.

이러한 장기 운전 관점은 Binglin Guo 박사와의 인터뷰를 통해 미량오염물질 문제로 구체화되었다. PFAS는 단순한 제거 대상 오염물질이 아니라, 에너지 소비 증가, 분석 인프라 부담, 2차 폐기물 관리 문제를 연쇄적으로 유발하는 전략적 한계 오염물질로 작용하며, 이는 반도체 공정수 재이용 정책이 기술 성능 경쟁을 넘어 리스크 관리 중심의 정책 프레임으로 전환되어야 함을 분명히 보여준다.

마지막으로 Amin Mojiri 박사와의 인터뷰는, 기존 액상 폐수 중심의 수자원 재이용 정책이 갖는 구조적 한계를 보완하는 시각을 제공하였다. Mojiri 박사의 AWH 연구는 반도체 제조 및 데이터센터 냉각 과정에서 발생하는 수증기 손실과 폐열이 기존 수처리 인프라의 관리 범위 밖에 놓여 있음을 지적하며, 이러한 비가시적 손실 또한 회수·관리 가능한 자원으로 재인식할 필요가 있음을 보여주었다. 이는 수자원 재이용 정책이 액상 폐수 처리에 한정되지 않고, 에너지 흐름과 결합

된 통합 자원 관리 정책으로 확장되어야 함을 시사한다.

종합하면, 본 해외 탐사는 반도체 클러스터의 에너지·수자원 문제를 개별 기술의 문제가 아닌, 인프라 설계, 운영 철학, 정책 구조가 결합된 복합 시스템 문제로 재인식하게 하는 계기를 제공하였다. 이를 통해 본 연구팀은 완공을 앞두고 있는 용인 반도체 클러스터에서, 에너지와 수자원을 통합적으로 고려하는 정책적 접근이 왜 필요한지에 대한 실증적·개념적 근거를 확보할 수 있었으며, 이는 반도체 클러스터 정책이 단기 효율 개선을 넘어 장기 지속가능성을 확보하는 방향으로 발전하는 함을 이해하는데 직접적인 도움이 되었다는 점에서 의의가 있다.

ii. 정책적 제언

본 장에서는 미국 반도체 클러스터 탐사 및 전문가 인터뷰를 통해 도출된 시사점을 바탕으로, 용인 반도체 클러스터의 에너지·수자원 정책이 어떠한 방향으로 설계되고 전환되어야 하는지를 단계적으로 정리한다. 정책적 제언은 개별 기술 도입의 나열이 아닌, 클러스터 차원의 인프라 설계 철학과 운영 현실을 반영한 구조적 접근을 중심으로 구성하였다.

특히 본 팀은 반도체 산업의 에너지 및 수자원 문제가 공정 내부의 효율 개선만으로 해결될 수 없으며, 전력·수자원·도시 인프라가 결합된 클러스터 운영 구조 속에서 재정의되어야 한다는 문제의식을 공유하였다. 이에 따라 본 장의 정책적 제언은 각 인터뷰에서 확인된 핵심 인사이트를 출발점으로 삼되, 이를 단순한 의견 정리가 아닌 정책 설계 차원의 논리로 확장하여 제시하고자 한다.

1. 전력 인프라 정책 제언 도출의 출발점

Intel Chandler Campus 김종수 엔지니어와의 인터뷰는 반도체 클러스터에서 전력 인프라가 갖는 위상을 공정 지원 요소가 아닌, 클러스터 존속을 좌우하는 핵심 기반 조건으로 인식하게 만드는 계기가 되었다. 애리조나 사례에서 확인된 전력 운영 방식은, 전력 효율이나 비용 절감보다 무중단 운영과 공급 안정성이 최우선 가치로 설정되어 있으며, 이는 반도체 팹의 입지 결정과 장기 운영 전략에 직접적인 영향을 미치고 있었다.

본 팀은 이러한 인터뷰 내용을 통해, 용인 반도체 클러스터의 전력 정책 역시

공정 단위의 전력 절감이나 설비 효율 향상 논의에 머물러서는 안 되며, 클러스터 차원의 전력 공급 구조와 운영 원칙을 중심으로 재설계되어야 한다는 점을 확인하였다. 이를 바탕으로 반도체 클러스터 전력 인프라가 지향해야 할 정책적 방향을 다음과 같이 도출하였다.

1-1. 반도체 클러스터 전력 인프라는 공정 효율화보다 무중단·안정성을 최우선 목표로 설계되어야 한다.

인터뷰를 통해 확인된 애리조나 반도체 클러스터의 전력 운영 원칙은, 전력 효율이나 비용 절감이 아닌 무중단 운영과 공급 안정성이 모든 의사결정의 출발점이라는 점에 있다. 반도체 팹은 24시간 365일 상시 가동을 전제로 운영되며, 전력 공급의 일시적 불안정이나 중단은 단순한 비용 증가가 아니라 공정 붕괴와 수율 손실로 직결된다. 이러한 산업 특성으로 인해 애리조나에서는 전력 인프라를 ‘절감 대상’이 아닌 ‘절대적 전제 조건’으로 인식하고 있으며, 이는 반도체 팹의 입지 선정과 장기 운영 전략에 직접적으로 반영되고 있다.

특히 고온·건조한 사막 환경이라는 불리한 조건 속에서도 반도체 산업이 안정적으로 운영될 수 있었던 배경에는, 기저부하를 안정적으로 담당할 수 있는 전력 공급 구조가 선제적으로 구축되어 있었다는 점이 자리한다. 애리조나의 사례는 반도체 클러스터 전력 정책이 개별 공정이나 설비 차원의 효율 개선만으로는 충분하지 않으며, 클러스터 전체를 지탱하는 전력 공급 구조의 안정성이 선결 조건임을 분명히 보여준다.

따라서 용인 반도체 클러스터 역시 공정 단위 전력 절감 목표를 우선 설정하기보다는, 기저부하를 안정적으로 감당할 수 있는 전력 인프라 확보를 정책의 최상위 목표로 설정할 필요가 있다.

1-2. 용인 반도체 클러스터의 전력 정책은 원자력 발전을 단순한 발전 설비가 아닌, 지역 사회와의 이익 공유를 전제로 한 인프라로 설계해야 한다.

애리조나 사례에서 확인된 또 하나의 중요한 시사점은, 원자력 발전이 단순한 전력 생산 수단을 넘어 지역 사회와 산업이 위험과 이익을 함께 분담하는 인프라로 기능하고 있다는 점이다. 원자력 발전은 반도체 산업이 요구하는 대규모·연속

전력 수요를 충족할 수 있는 현실적인 기저부하 전원으로 활용되고 있으며, 동시에 고용 창출, 세수 확보, 지역 인프라 개선 등 지역 사회에 실질적인 편익을 제공하는 구조 속에서 수용성을 확보하고 있다.

이는 원자력 발전에 대한 사회적 수용성이 기술적 안전성만으로 확보되는 것이 아니라, 지역 사회가 체감할 수 있는 구체적인 이익 구조와 결합될 때 가능하다는 점을 시사한다. 용인 반도체 클러스터에서도 안정적인 기저부하 전력원 확보를 위해 원자력 기반 전력 공급을 논의할 경우, 발전 설비의 입지를 둘러싼 위험 부담을 일방적으로 지역에 전가하는 방식은 정책적 한계를 가질 수밖에 없다.

따라서 전력 정책은 발전 설비 자체의 도입 여부를 넘어, 지역 고용, 재정 기여, 인프라 투자 등 지역 사회에 환원되는 이익을 제도적으로 명확히 설계하는 방향으로 접근될 필요가 있다.

1-3. 전력, 수자원 위기 상황에서 산업과 주민 간 자원 배분 원칙을 사전에 명확히 설정해야 한다.

인터뷰에서 언급된 텍사스 반도체 팹 가동 중단 사례는, 극한 기후나 전력 위기 상황에서 산업과 주민 간 자원 배분 원칙이 얼마나 중요한지를 보여주는 대표적인 사례이다. 해당 사례에서 반도체 팹은 기술적·경제적 손실을 감수하더라도, 도시 전력을 주민 생활에 우선 공급하는 정책적 판단에 따라 가동을 중단하였다.

이러한 결정은 사후적 임기응변이 아니라, 평상시부터 공유된 사회적 합의와 제도적 원칙에 기반한 것이다. 반도체 클러스터와 같은 대규모 산업 단지는 지역 사회와 동일한 전력·수자원 인프라를 공유하는 만큼, 위기 상황에서의 자원 배분 기준을 사전에 명확히 설정하지 않을 경우 갈등과 혼란이 증폭될 가능성이 크다.

따라서 용인 반도체 클러스터 역시 정전, 가뭄, 극한 기후 등 비상 상황을 전제로, 산업과 지역 사회 간 자원 배분 우선순위를 사전에 합의하고 이를 제도화함으로써 장기적 운영 리스크를 최소화할 필요가 있다.

1-4. 클러스터 단위 인프라 운영은 절감 중심이 아니라 품질과 리스크 관리 중심으로 접근해야 한다.

애리조나 반도체 클러스터에서 전력, 물, 화학물질과 같은 핵심 인프라가 중앙

집중형으로 관리되는 이유는 자원 절감을 위해서가 아니다. 오히려 이는 품질 편차나 공급 불안정이 개별 팹을 넘어 클러스터 전체로 확산되는 것을 방지하기 위한 구조적 대응이다. 중앙에서 통합적으로 관리되는 인프라는 품질 이상이나 공급 장애 발생 시 신속한 감지와 대응을 가능하게 하며, 이를 통해 공정 안정성을 유지할 수 있다.

이러한 운영 방식은 단기적인 비용 절감과는 거리가 있을 수 있으나, 장기적으로는 공정 중단 리스크와 품질 사고로 인한 손실을 최소화하는 데 기여한다. 용인 반도체 클러스터 역시 전력 인프라 운영을 단기 절감 관점에서 접근하기보다는, 품질 유지와 리스크 관리라는 관점에서 중앙 통합 관리 구조를 설계·운영할 필요가 있다.

1-5. 재이용수 확대 정책은 전력 인프라 안정성과 사회적 수용성을 전제로 단계적으로 추진되어야 한다.

애리조나에서는 물 재이용이 선택이 아닌 필수 조건으로 작동하고 있으나, 이는 충분한 전력 공급과 도시 생활에 영향을 주지 않는 운영 구조가 전제되었기에 가능했다. 반면 전력 여건이 상대적으로 제한적인 한국의 경우, 물 재이용 확대 정책이 추가적인 전력 부담을 동반할 수 있다는 점을 충분히 고려하지 않을 경우, 오히려 공정 안정성을 저해할 가능성이 존재한다.

따라서 용인 반도체 클러스터에서는 재이용수 활용 확대를 독립적인 수자원 정책으로 추진하기보다는, 전력 인프라 안정화 이후 전력·수자원·지역 사회 수용성을 함께 고려한 종합 인프라 정책으로 단계적으로 추진하는 접근이 필요하다.

1-6. 대학과 연구기관을 클러스터 운영의 보조 주체가 아닌 핵심 정책 파트너로 포함해야 한다.

애리조나 반도체 클러스터에서는 대학과 연구기관이 단순한 기술 자문 주체를 넘어, 산업·도시·정책을 연결하는 핵심 중개자로 기능하고 있다. ASU를 비롯한 지역 대학들은 수자원 재이용, 에너지 효율화, 인프라 정책 검증 과정에서 산업과 지방정부를 연결하는 역할을 수행하며, 장기적인 클러스터 운영 전략 수립에 기여하고 있다.

용인 반도체 클러스터 역시 대학과 연구기관을 단순한 연구 수행 주체로 한정하기보다는, 전력·수자원 인프라 설계와 정책 검증을 함께 수행하는 핵심 파트너로 제도화할 필요가 있다. 이는 단기적 기술 도입을 넘어, 장기적 운영 안정성과 정책 신뢰성을 확보하는 데 중요한 기반이 될 것이다.

이러한 정책 제언들은 안정적인 기저부하 전력원의 중요성을 전제로 하고 있지만, 현실적으로 우리나라에서 원자력 발전 설비를 추가적으로 확충하는 데에는 입지 갈등과 사회적 수용성이라는 구조적 제약이 존재한다. 특히 대규모 산업 전력 수요가 예상되는 지역에 새로운 발전원을 설치하는 방식은 단기간에 해결되기 어려운 과제로 남아 있다. 이러한 조건 속에서 현재의 전력 정책은 발전원 자체를 늘리는 방식보다는, 이미 존재하는 전력 자원을 지역 간에 안정적으로 연결하고 계통 신뢰도를 높이기 위한 장거리 송전망 구축에 점차 비중을 두고 추진되고 있다.

따라서 다음의 정책 제언들은 이러한 현실적 제약을 전제로, 장거리 송전망 중심의 전력 인프라가 산업 클러스터를 효과적으로 뒷받침하기 위한 방향에 초점을 둔다.

1-7. 장거리 송전망은 단일 노선 중심이 아닌 다중 경로 기반의 네트워크 구조로 설계되어야 한다.

장거리 송전망을 통해 대규모 전력을 수송하는 구조에서는 특정 노선에 전력 흐름이 집중될 경우, 사고나 설비 이상 발생 시 계통 전반으로 리스크가 확산될 가능성이 크다. 특히 반도체 클러스터와 같이 전력 수요가 상시적으로 유지되어야 하는 환경에서는 단일 송전 축에 대한 의존도가 높아질수록 시스템 취약성이 구조적으로 증폭될 수 있다.

따라서 장거리 송전망은 하나의 축에 의존하는 방식이 아니라, 보조 노선과 우회 경로를 포함한 다중 경로 기반의 네트워크 구조로 설계될 필요가 있다.

1-8. 장거리 송전망 구축은 계통 안정화를 전제로 한 에너지 저장 인프라와 함께 설계되어야 한다.

장거리 송전은 지역 간 전력 불균형을 해소하는 데 효과적이지만, 전력 수요와

공급의 시간적 변동성을 자체적으로 조절하는 데에는 한계가 있다. 특히 재생에너지 비중이 높은 전원과 연계될 경우, 출력 변동성이 계통 안정성에 추가적인 부담으로 작용할 수 있다.

이에 따라 장거리 송전망과 연계된 주요 거점에는 에너지 저장 장치(ESS)를 계통 안정 설비로 함께 구축하는 접근이 필요하다. ESS는 단순한 전력 저장 수단을 넘어, 송전 혼잡 완화와 주파수 안정화에 기여함으로써 장거리 송전망 중심 전력 인프라의 실효성을 높이는 핵심 요소로 기능할 수 있다.

2. 수자원 재이용 정책 제언 도출의 출발점

앞선 전력 인프라 논의는 반도체 클러스터의 안정성이 개별 공정이나 설비의 효율 개선이 아니라, 기반 인프라의 설계 철학과 운영 원칙에 의해 좌우된다는 점을 분명히 보여주었다. 이러한 문제의식은 전력 인프라에 국한되지 않으며, 수자원 재이용 정책에서도 동일하게 적용될 필요가 있다.

특히 반도체 제조 공정의 미세화와 함께 초고순도수(UPW) 수요가 구조적으로 증가하는 상황에서, 수자원 재이용은 선택적 환경 대응 수단이 아니라 클러스터 존속을 좌우하는 핵심 인프라 요소로 부상하고 있다.

Marisol Cira와의 인터뷰를 통해 확인된 핵심 인사이트는, 반도체 클러스터의 수자원 재이용 문제가 고성능 수처리 기술의 존재 여부가 아니라, 실제 운전 조건에서의 안정성과 유지관리 가능성에 의해 좌우된다는 점이다. 이를 토대로 본 연구팀은 기존의 기술 도입 중심 정책이 갖는 한계를 점검하고, 다음과 같은 운영·실증 중심의 정책적 방향성을 도출하였다.

2-1. 기술 도입 중심 정책에서 공정 단위 실증·운영 데이터 축적 중심 정책으로의 전환

현재 반도체 산업과 연계된 수자원 정책은 고도 처리 기술의 성능 증명이나 처리 효율 수치에 정책적 초점이 집중되는 경향이 강하다. 그러나 Dr. Cira의 연구 및 현장 경험에 따르면, 막 생물반응기(MBR) 및 혐기성 막 생물반응기(AnMBR)와 같은 고도 수처리 공정의 성패는 이론적 제거율이 아니라 실제 운전 조건에서의 안정성, 유지관리 가능성, 그리고 장기 신뢰성에 의해 결정된다.

특히 반도체 클러스터와 같이 대규모·연속 운전이 요구되는 환경에서는, 공정이 장기간 안정적으로 유지되지 못할 경우 단기적인 처리 효율의 우수성은 정책적 의미를 갖기 어렵다. 그럼에도 불구하고 기존 정책 지원 체계는 여전히 기술 단위의 성능 평가에 집중되어 있어, 유입수 변동성, 미생물 군집 변화, 막 오염 축적과 같은 운영 리스크를 충분히 검증할 수 있는 기회를 제공하지 못하고 있다.

이에 따라 향후 수자원 정책은 개별 처리 기술의 도입 여부를 판단하는 수준을 넘어, 공정 단위의 파일럿 실증과 클러스터 연계 실증을 통해 실제 운영 데이터를 체계적으로 축적하는 방향으로 전환될 필요가 있다. 이는 단순한 연구 지원이 아니라, 반도체 클러스터 조성 단계에서부터 수자원 재이용 공정을 핵심 인프라로 포함시키고, 장기 운전 안정성을 정책적으로 검증하는 제도적 장치를 마련해야 함을 의미한다.

2-2. UF 및 고도 정수 공정을 보호하기 위한 모니터링·운영 관리 체계에 대한 전략적 투자 필요성

Dr. Cira는 인터뷰를 통해, 재이용수 내 잔존 미생물로 인한 biofouling 문제가 단순히 막 성능의 한계에서 비롯되는 것이 아니라, 모니터링과 운영 관리 전략의 부재에서 발생하는 경우가 많다는 점을 강조하였다. 이는 반도체 클러스터 수자원 재이용 시스템 설계에 중요한 시사점을 제공한다.

현재 많은 수처리 설계에서는 UF 및 고도 정수 공정을 ‘최종 방어선’으로 설정하고, 해당 공정에 최대한의 정화 역할을 기대하는 경향이 있다. 그러나 이러한 접근은 막 오염 가속화, 수명 단축, 운영 비용 증가로 이어질 가능성이 높으며, 장기적으로는 시스템 전체의 안정성을 저해할 수 있다.

이에 따라 정책적으로는 설비 구축 자체에 대한 투자보다, 막 차압, 유기물 부하, 용존산소, 유량 변화 등 운영 지표를 기반으로 한 사전 모니터링 및 예측 관리 체계 구축에 대한 전략적 지원이 필요하다. 이러한 관리 체계는 biofouling이 심각한 문제로 표면화되기 이전 단계에서 공정 이상을 감지하고 선제적으로 대응할 수 있게 해준다.

장기적인 관점에서 볼 때, 이러한 운영 관리 중심의 투자는 수질 안정성 확보, 막 수명 연장, 유지관리 비용 절감이라는 세 가지 효과를 동시에 달성할 수 있는

핵심 정책 수단으로 인식될 필요가 있다.

2-3. 물-에너지 넥서스를 통합적으로 고려한 클러스터 설계 기준의 필요성

반도체 클러스터의 지속가능성을 논의할 때, 수자원 재이용 정책과 에너지 정책을 분리하여 접근하는 방식은 점차 한계에 직면하고 있다. Dr. Cira는 인터뷰에서 수자원 재이용률 증가가 반드시 에너지 소비 증가로 이어진다는 기존의 단순한 인식은, 특정 공정 구조를 전제로 형성된 결과일 뿐 절대적인 관계는 아니라고 지적하였다.

이는 수자원 재이용 정책이 개별 기술의 효율 논의에 머무를 것이 아니라, 공정 구조와 운영 방식 전반을 포함한 시스템 설계 문제로 재검토되어야 함을 의미한다. 물과 에너지를 개별 자원으로 취급하는 기존 정책 프레임에서 벗어나, 클러스터 차원에서 물-에너지 상호작용을 통합적으로 고려하는 설계 기준과 평가 지표가 필요하다.

따라서 향후 반도체 클러스터 설계 단계에서는 물 재이용률 극대화 와 에너지 소비 최소화를 분리된 목표로 설정하기보다, 장기 운전 안정성과 시스템 효율을 동시에 평가할 수 있는 통합적 정책 기준을 도입할 필요가 있다. 이는 단기적인 기술 대응이 아니라, 반도체 산업의 장기적 지속가능성을 구조적으로 확보하기 위한 핵심 정책 조건이다.

Marisol Cira와의 인터뷰를 통해 도출된 정책적 시사점은, 반도체 클러스터의 수자원 재이용 문제가 고도 처리 기술의 정밀성 경쟁이 아니라, 실제 운전 조건에서의 안정성, 유지관리 가능성, 그리고 장기적 신뢰성을 중심으로 재설계되어야 할 인프라 정책 과제임을 분명히 보여준다. 이는 수자원 재이용 정책이 개별 기술 도입 여부에 초점을 둔 단기 성과 중심 접근에서 벗어나, 실증과 운영 데이터 축적을 기반으로 단계적으로 확장되는 구조적 정책 프레임으로 전환되어야 함을 시사한다.

이러한 문제의식은 자연스럽게 다음 질문으로 이어진다. 장기 운전 안정성을 확보하면서도, 수자원 재이용 확대 과정에서 불가피하게 수반되는 에너지 부담을 어떻게 구조적으로 완화할 수 있는가 하는 문제이다. 특히 반도체 클러스터와 같이 24시간 연속 가동이 요구되는 대규모 산업 인프라에서는, 수자원 재이용 확대를

기존 에너지 구조 위에서 단순히 누적할 경우, 에너지 소비 증가가 곧바로 클러스터 전체의 운영 리스크로 전이될 가능성이 크다. 따라서 수자원 정책은 처리 기술의 성능 논의를 넘어, 에너지 인프라와의 연계 구조를 함께 고려하는 방향으로 확장될 필요가 있다.

이에 본 연구팀은 수처리 공정을 단순한 정화 설비가 아닌, 에너지·자원 순환 인프라로 재해석할 필요가 있다고 판단하였다. 이러한 관점에서 수행된 Harmita Golwala와의 인터뷰는, 반도체 클러스터 수자원 정책이 전처리 공정의 역할을 어떻게 재정의하고, 동시에 에너지 회수 및 부담 완화 가능성을 어떤 구조에서 모색해야 하는지에 대한 중요한 정책적 시사점을 제공하였다.

3. 전처리 공정 및 에너지 회수 기반 정책 제언 도출의 출발점

Harmita Golwala와의 인터뷰가 갖는 가장 큰 의의는, 반도체 클러스터의 수자원 문제를 단순히 ‘고순도 공정수 확보’ 라는 기술적 목표로 한정하지 않고, 수처리 공정 자체를 에너지·자원 순환 인프라로 재해석할 수 있는 시각을 제공했다는 점에 있다. 이는 기존 반도체 수자원 정책이 주로 후단 RO, AOP, UPW 시스템의 정밀도와 안정성에 초점을 맞춰 왔던 접근과 명확히 구분되는 관점이다.

특히 Dr. Golwala의 연구는 실험실 개념 검증에 머무르지 않고, 실제 운전이 가능한 파일럿 규모 시스템을 기반으로 수행되고 있다는 점에서 정책적 시사점이 크다. AnMBR(Anaerobic Membrane Bioreactor) 공정의 에너지 회수 성능, 막 오염 거동, 장기 운전 안정성에 대한 논의는, 반도체 제조시설이나 클러스터 단위 수자원 재이용 시스템을 설계할 때 필연적으로 직면하게 되는 현실적 제약 조건과 직접적으로 연결된다. 이를 바탕으로 본 연구팀은 다음과 같은 정책적 방향성을 도출하였다.

3-1. 저에너지 전처리 공정을 핵심 인프라 기술로 재정의할 필요성

반도체 클러스터 차원에서 저에너지 전처리 공정에 대한 정책적 지원을 전략적으로 확대할 필요가 있다. AnMBR과 같은 혐기성 기반 수처리 기술은 기존의 고에너지 호기성 공정과 달리 외부 포기(aeration)를 필요로 하지 않으면서도 안정적인 유기물 제거가 가능하며, 동시에 에너지 회수 잠재력을 내재하고 있다.

이는 전처리 공정을 단순히 후단 고도 정수 공정을 보호하기 위한 보조 단계가 아니라, 클러스터 전체의 에너지 소비 구조를 완화할 수 있는 핵심 인프라 기술로 재정의해야 함을 의미한다. 특히 반도체 제조 공정은 24시간 연속 가동되는 특성상 전력 수요가 상시적으로 높고, 클러스터 규모가 확대될수록 전력 피크 관리가 중요한 정책 과제로 부상한다. 이러한 상황에서 저에너지 전처리 공정은 수자원 재이용 확대에 따른 전력 부담을 구조적으로 완화할 수 있는 수단으로 기능할 수 있다.

3-2. 클러스터 단위 통합 수자원 관리 모델에 대한 제도적 검토 필요성

개별 팹(fab) 단위를 넘어선 클러스터 단위 통합 수자원 관리 모델에 대한 제도적 검토가 필요하다. 현재 많은 반도체 제조시설에서는 공정 특성과 보안, 운영상의 이유로 수자원 재이용 시스템을 개별 팹 단위에서 분절적으로 운영하고 있다. 그러나 이러한 방식은 설비 중복, 관리 비용 증가, 공정 간 수질 편차 확대라는 구조적 한계를 내포한다.

반면, 클러스터 단위의 중앙 집중형 수자원 재이용 시스템을 구축할 경우, 전처리- 고도처리 - 재이용 전 과정을 하나의 통합 인프라로 설계할 수 있으며, 이를 통해 공정 효율성과 관리 안정성을 동시에 확보할 수 있다. 특히 AnMBR과 같은 공정은 대규모 처리에 적합한 구조를 가지므로, 클러스터 단위 적용 시 규모의 경제를 실현할 가능성이 크다.

이에 따라 산업단지 계획 단계에서부터 수자원 재이용 시설과 에너지 회수 설비를 도로·전력·가스 인프라와 동일한 위계의 핵심 기반시설로 포함시키는 정책적 접근이 요구된다.

3-3. 에너지 회수형 수처리 기술에 대한 실증 사업 및 파일럿 프로젝트 지원의 중요성

에너지 회수형 수처리 기술에 대한 중·대규모 실증 사업과 파일럿 프로젝트에 대한 정책적 지원이 필수적이다. AnMBR과 같은 공정은 이론적으로 높은 잠재력을 가지고 있음에도 불구하고, 실제 산업 환경에서의 장기 운전 데이터가 충분히 축적되지 않을 경우 도입 결정이 지연될 수밖에 없다.

특히 반도체 산업은 공정 안정성과 리스크 관리가 최우선시되는 분야이기 때문

에, 실증 데이터의 부재는 기술 도입의 가장 큰 장애 요인으로 작용한다. 이에 따라 공공 부문과 산업계가 협력하여, 반도체 클러스터 또는 인접 수처리 시설을 대상으로 한 단계적 파일럿 프로젝트를 추진할 필요가 있다.

이러한 실증 사업은 에너지 회수량, 막 오염 관리, 장기 운전 안정성, 유지관리 비용 등 핵심 성능 지표에 대한 데이터를 축적할 수 있는 기반을 제공하며, 향후 민간 주도의 확산을 촉진하는 정책적 근거로 활용될 수 있다.

Harmita Golwala와의 인터뷰를 통해 도출된 정책적 시사점은, 반도체 클러스터의 수자원 재이용 정책이 고도 처리 기술 중심의 접근을 넘어 전처리 공정과 에너지 회수 전략을 포함하는 통합 인프라 설계 과제로 전환되어야 함을 분명히 한다. 이는 수자원 재이용을 단순한 환경 대응 수단이 아니라, 에너지와 자원 순환을 동시에 고려하는 클러스터 운영 전략의 핵심 요소로 재정의해야 함을 시사한다.

이러한 문제의식을 바탕으로 본 연구팀은, 반도체 수처리 공정을 단순한 후단 정화 설비가 아닌 클러스터 전체의 에너지 및 자원 흐름을 조정하는 핵심 인프라 요소로 재해석할 필요가 있다고 판단하였다. 그러나 이러한 통합적 접근이 실제 반도체 클러스터 규모에서 구현되기 위해서는, 개별 공정의 성능 향상만으로는 해결하기 어려운 공정 간 연계 지점에서의 기술적·운영적 병목을 보다 정밀하게 검토할 필요가 있다.

특히 UF - RO-결정화(ZLD)로 이어지는 기존 반도체 폐수 재활용 공정은, 단일 공정의 성능 한계보다는 장기 운전 과정에서 누적되는 미량 불순물과 공정 간 상호작용에 의해 구조적 제약이 형성되는 경우가 많다. 이에 본 연구팀은 이상석 박사와의 인터뷰를 통해, 반도체 폐수 재이용 시스템의 통합 운전 병목과 장기 운전 리스크를 중심으로 정책적으로 고려해야 할 핵심 쟁점들을 도출하였다.

4. 공정 통합 및 장기 운전 관점에서의 정책적 쟁점

이상석 박사와의 인터뷰는, 반도체 클러스터 수자원 재이용 논의가 개별 처리 기술의 성능 개선에 집중될 경우 놓치기 쉬운 시스템 차원의 병목과 리스크를 구조적으로 드러냈다는 점에서 중요한 의미를 가진다. 인터뷰를 통해 확인된 핵심

은, 반도체 폐수 재활용 공정의 한계가 특정 UF 또는 RO 멤브레인의 성능 부족에서 비롯되는 것이 아니라, UF-RO-결정화 공정이 분절적으로 설계·운영되는 구조 자체에서 강화되고 있다는 점이었다.

특히 반도체 공정의 미세화와 함께 폐수 내 오염물 조성이 복잡해지면서, 기존 입자·이온 중심 관리 체계로는 충분히 대응하기 어려운 초미량 불순물이 새로운 수질 리스크로 부상하고 있음이 지적되었다. 이를 바탕으로 본 연구팀은 다음과 같은 정책적 쟁점을 도출하였다.

4-1. 반도체 수자원 정책은 UF-RO-결정화 공정을 하나의 시스템으로 통합 최적화하는 방향으로 전환되어야 한다.

이상석 박사에 따르면, 반도체 폐수 재활용 공정에서 발생하는 주요 병목은 UF, RO, 결정화(ZLD) 각 공정의 개별 성능이 아니라, 공정 간 연계 지점에서의 부하 집중과 누적 효과에서 발생한다. 난분해성 유기물 처리 한계, RO 공정에서의 미량 불순물 제거율 저하, 결정화 단계에서의 에너지 부담 증가는 모두 공정이 분절적으로 설계되고 운영될 때 구조적으로 심화된다.

그럼에도 불구하고, 현재 정책 및 연구 지원은 여전히 개별 UF 또는 RO 멤브레인의 성능 향상에 초점을 맞추고 있어, 장기 운전 안정성과 시스템 전체 효율을 충분히 반영하지 못하고 있다. 이에 따라 반도체 수자원 재이용 정책은 공정 단위 기술 개발 중심 접근에서 벗어나, UF-RO-결정화 공정을 하나의 연속 시스템으로 통합 설계하고 운영하는 관점에서 연구와 실증을 지원하는 방향으로 전환될 필요가 있다.

4-2. 난분해성 유기물 및 용스트롬 단위 미량 불순물 문제를 반영한 정책 설계가 필요하다.

인터뷰 결과, 신규 포토레지스트 및 특수 화학물질의 도입으로 기존 생물학적 처리 공정의 안정적 운전이 점차 어려워지고 있으며, 이는 폐수 재활용 공정 전반의 신뢰성을 저하시킨다. 특히 요소(urea) 및 질소계 미량 물질과 같은 용스트롬 단위 불순물은 기존 RO 공정에서 약 50% 수준의 제거율에 머물러 있어, 향후 UPW 재활용 고도화 과정에서 핵심 리스크 요인으로 작용할 가능성이 크다.

이에 따라 정책적으로는 생물학적 처리에 대한 과도한 의존도를 낮추는 한편, 멤브레인 개질 기술, 공정 조합 최적화 등 대체·보완 기술을 전략적 지원 대상으로 설정할 필요가 있다. 동시에 차세대 UPW 재활용 수질 기준에 미량 불순물 항목을 명시적으로 반영함으로써, 기술 개발 방향과 정책 기준 간의 정합성을 확보해야 한다.

4-3. 장기 운전 안정성과 운영 리스크를 평가할 수 있는 실증 중심 정책으로 전환해야 한다.

이상석 박사는 UF 멤브레인의 장기 운전에서 가장 큰 제한 요인으로 파울링을 지적하며, 이를 완전히 제거하기보다는 발생 시점을 지연시키고 세정·교체 주기를 관리하는 전략이 현실적인 해법이라고 평가하였다. 또한 CMP 폐수와 같이 나노 입자가 포함된 시스템에서는 단기 투과량보다 분리 안정성이 훨씬 중요한 성능 지표로 작용한다고 지적하였다.

그럼에도 불구하고 현재 정책 및 실증 논의에서는 여전히 단기 투과량이나 처리 용량 중심의 성과 지표가 우선시되는 경향이 있다. 이에 따라 정책적으로는 단기 성능 수치 중심 평가에서 벗어나, 장기 운전 안정성, 분리 안정성, 파울링 관리 성능을 검증할 수 있는 파일럿 실증 인프라 구축을 정책 지원의 중심에 둘 필요가 있다. 아울러 AI 및 디지털 트윈 기술 역시 효율 극대화 수단이 아니라, 운영 리스크를 관리하고 의사결정을 보조하는 도구로 단계적으로 활용하는 정책적 위치 설정이 요구된다.

이상석 박사와의 인터뷰를 통해 확인된 바와 같이, 반도체 폐수 재이용 시스템의 한계는 특정 공정 성능의 부족이 아니라, 장기 운전 과정에서 누적되는 미량 불순물과 공정 간 상호작용에 의해 구조적으로 규정될 가능성이 크다. 이는 수자원 재이용 정책이 재이용률 확대나 고도 처리 기술 도입에만 초점을 둘 경우, 오히려 공정 안정성과 에너지 부담을 동시에 확대할 수 있음을 시사한다.

이러한 문제의식은 반도체 수자원 재이용 정책의 실효성이, 어떤 오염물질을 핵심 관리 대상으로 설정하느냐에 따라 결정될 수 있음을 의미한다. 특히 반도체 공정수 재이용과 같이 초고순도수(UPW)가 요구되는 환경에서는, 극미량의 특정 오염물질이 전체 시스템의 설계 기준과 운영 비용을 규정하는 한계 요인(limiting

factor)으로 작용할 수 있다. 따라서 정책 설계 단계에서부터 이러한 한계 오염물질을 선별하고 관리 전략을 설정하는 접근이 요구된다.

이에 본 연구팀은 Binglin Guo 박사와의 인터뷰를 통해, PFAS를 반도체 공정수 재이용 시스템에서 단순히 제거 대상 오염물질로 인식하는 기존 접근을 넘어, 정책 설계 단계에서부터 고려되어야 할 전략적 ‘한계 오염물질’로 재해석할 필요성을 도출하였다. 다음 장에서는 이러한 관점에서 PFAS를 중심으로, 반도체 클러스터 수자원 재이용 정책이 어떻게 재구성되어야 하는지를 논의하고자 한다.

5. PFAS를 중심으로 한 전략적 한계 오염물질 관점의 정책적 재구성

Binglin Guo 박사와의 인터뷰는, 반도체 클러스터 수자원 재이용 정책이 기술 중심 접근에 머물 경우 필연적으로 직면하게 되는 정책적·에너지적 병목을 PFAS 사례를 통해 집약적으로 보여주었다는 점에서 중요한 의미를 가진다. 인터뷰를 통해 확인된 핵심은, PFAS가 단순히 제거가 어려운 오염물질이 아니라, 공정 복잡성, 에너지 소비, 분석 신뢰성, 2차 폐기물 관리 문제까지 동시에 제약하는 구조적 한계 요인이라는 점이었다.

이를 바탕으로 본 연구팀은 다음과 같은 정책적 쟁점을 도출하였다.

5-1. PFAS를 반도체 공정수 재이용 시스템의 ‘전략적 한계 오염물질’로 재정의해야 한다.

PFAS는 단순히 제거가 어려운 미량오염물질이 아니라, 반도체 공정수 재이용 시스템 전반의 에너지 소비, 공정 복잡성, 분석 신뢰성, 그리고 2차 폐기물 관리 문제까지 동시에 제약하는 구조적 한계 요인이다. 특히 고순도UPW가 요구되는 반도체 제조 환경에서는PFAS의 극미량 잔존 자체가 공정 안정성과 제품 신뢰성에 직결되지만, 현행 정책 체계에서는 이를 일반 유기오염물질과 동일한 범주에서 다루는 경향이 강하다. 이에 따라 향후 반도체 수자원 정책 및UPW 재이용 가이드라인에서는PFAS를 ‘Critical Limiting Contaminant’로 명확히 규정하고, 공정수 재이용의 기술적·경제적 한계를 설정하는 기준 오염물질로 관리할 필요가 있다. 더 나아가PFAS 문제를 환경 규제 차원이 아니라 반도체 클러스터의 지속 가능성을 좌우하는 산업 인프라 리스크로 인식하고, 반도체 산업 정책·수자원 정책·환

경 정책을 연계하는 통합 거버넌스 체계를 구축하는 방향으로 정책 프레임을 전환해야 한다.

5-2. 단일 제거 기술 중심 접근에서 공정 통합·에너지 연계형 PFAS 대응 전략으로 전환해야 한다.

PFAS의 완전 무기화를 단일 기술로 달성하려는 접근은 고에너지 요구와 낮은 농도 특성으로 인해 산업적 확장성에 근본적인 한계를 가진다. 특히 자외선, 전기화학, 고급 산화·환원 공정과 같은 분해 기술은 에너지 소비가 크며, 대규모 반도체Fab 또는 클러스터 단위 적용 시 경제성과 지속가능성 측면에서 부담이 급격히 증가한다. 이에 따라 정책적 연구 지원은 개별 기술의 제거율 경쟁에서 벗어나, 농축-제한적 분해-안전한 최종 처리로 이어지는 단계적 역할 분담형 공정 통합 전략을 중심으로 재편될 필요가 있다. 또한PFAS 대응을 수자원 정책 단독 영역이 아닌 에너지·인프라 정책과 연계하여, 공정수 재이용률이 아닌 물-에너지 복합 효율을 핵심 성과 지표로 설정해야 한다. 이와 함께 흡착제, 멤브레인 등 물리적 제거 공정에서 발생하는PFAS 농축2차 폐기물에 대해서도 별도의 분류 기준과 처리 가이드라인을 마련함으로써, 제거 기술 지원과 폐기물 관리 정책이 분리되지 않도록 하는 종합적 정책 설계가 요구된다.

5-3. 반도체 폐수 실조건 기반의 PFAS 연구·분석·실증 체계를 핵심 정책 인프라로 구축해야 한다.

현재 다수의 PFAS 제거 연구는 저이온강도 합성수, 단일 오염물질 조건의 실험실 환경에 기반하고 있어, 고이온강도·중금속·유기용매·난분해성 유기물이 공존하는 실제 반도체 폐수 조건을 충분히 반영하지 못하고 있다. 이러한 괴리는 활성종 소거에 따른 분해 효율 저하, 장기 운전 안정성 문제 등으로 이어지며, 산업 현장 적용 시 성능 급락을 초래할 수 있다.

이에 따라 정책적으로는 반도체 산업 관련 PFAS 수질 매트릭스를 표준 실험 조건으로 정의하고, 실제 팹 폐수 또는 이에 준하는 조건에서의 파일럿 규모 장기 실증 연구를 핵심 지원 대상으로 설정할 필요가 있다. 동시에 ng/L 이하 수준의 분석 역량, 표준물질 라이브러리, 타겟·논타겟 분석을 포함한 국가 차원의 분석

인프라를 구축함으로써, PFAS 제거 여부를 객관적으로 검증할 수 있는 기반을 마련해야 한다.

아울러 UPW 재이용 정책에서 PFAS에 대한 완전 제거 기준을 재검토하여, 공정 위치별 차등 기준과 위험 기반 허용 기준을 도입함으로써 과도한 에너지 투입을 유발하는 비현실적 규제 구조를 개선할 필요가 있다.

Binglin Guo 박사와의 인터뷰를 통해 확인된 PFAS 사례는, 반도체 클러스터 수자원 재이용 정책이 어떤 오염물질을 기준으로 설계되느냐에 따라 정책의 기술적·에너지적 한계가 구조적으로 규정될 수 있음을 명확히 보여준다. 이는 수자원 재이용 정책이 단순히 재이용률 확대나 고도 처리 기술 도입을 목표로 설정할 경우, 오히려 공정 안정성과 에너지 부담을 동시에 확대할 수 있음을 시사한다.

이러한 한계는 기존 반도체 클러스터 수자원 관리 정책이 액상 폐수 처리 중심으로 설계되어 온 구조적 제약과도 맞닿아 있다. PFAS 사례는 고도 수처리 기술을 통해 회수 가능한 액상 폐수만을 정책 관리 범위로 설정할 경우, 제거 부담과 에너지 소비가 특정 공정에 과도하게 집중될 수 있음을 보여준다. 이는 정책의 실효성이 개별 처리 기술의 성능이 아니라, 관리 대상 수자원의 범위 설정 자체에 의해 제한될 수 있음을 의미한다.

더 나아가, 이러한 문제는 단순히 특정 오염물질의 관리 문제를 넘어, 현재 반도체 클러스터 수자원 정책이 어디까지를 물로 보고 관리하는가라는 경계 설정에 구조적 한계를 지니고 있음을 시사한다. 즉, 공정 및 냉각 과정에서 지속적으로 발생하는 수증기 형태의 수자원 손실은 제도적 관리 범위 밖에 놓여 있으며, 이는 클러스터 전체 물 수지(water balance)를 과소평가하게 만드는 요인으로 작용한다.

이에 본 연구팀은 수자원 재이용 정책의 범위를 액상 폐수 처리에 국한하지 않고, 공정·냉각 과정에서 발생하는 비가시적 수자원 손실까지 포함하는 방향으로 정책 범위를 확장할 필요성을 검토하였다. 이러한 문제의식 속에서 수행된 Amin Mojiri 박사의 연구는, 반도체 클러스터 수자원 관리 정책의 경계를 재설정하는 데 중요한 시사점을 제공하였다.

6. 수자원 관리 경계 확장을 위한 정책적 제언

Amin Mojiri 박사의 AWH(Atmospheric Water Harvesting) 연구는, 기존 수자원

재이용 정책이 전제로 해 온 액상 폐수 중심 관리 프레임의 한계를 명확히 드러낸다는 점에서 정책적으로 중요한 의미를 가진다. Mojiri 박사의 연구는 AWH를 독립적인 대체 수자원 기술로 제시하기보다는, 기존 산업 인프라에서 발생하는 열·습기 흐름을 활용하여 회수 가능한 보조적 수자원 회수 옵션으로 위치 짓고 있다는 점에서 현실적인 접근을 취하고 있다.

이를 바탕으로 본 연구팀은 다음과 같은 정책적 시사점을 도출하였다.

6-1. 수자원 관리 범위를 액상 폐수에서 공정·냉각 과정의 수증기 손실까지 확장해야 한다.

현재 반도체 클러스터에서 고려되는 수자원 관리 범위는 RO, UF 등 폐수를 중심으로 한 재이용 시스템에 국한되어 있다. 그러나 반도체 제조 및 데이터센터의 냉각 과정에서는 상당량의 물이 수증기 형태로 대기 중으로 손실되며, 이는 기존 수처리 인프라의 관리 범위에 포함되지 않는다. AWH 관련 연구는 이러한 비가시적 수자원 손실 또한 회수 가능한 대상으로 볼 수 있음을 보여주므로, 용인 반도체 클러스터에서도 액상 폐수뿐 아니라 증발 손실까지 포괄하는 수자원 관리 개념으로 정책 범위를 확장할 필요가 있다.

6-2. 용인 반도체 클러스터에서는 물 재이용과 전력 소비 간 trade-off를 개별 기술의 한계로 볼 것이 아니라, 공정 및 냉각 과정에서 발생하는 폐열을 활용하는 통합 인프라 전략을 통해 해결해야 한다.

반도체 제조 공정과 데이터센터는 대규모 냉각 시스템을 상시 운영하며, 이 과정에서 상당한 양의 폐열이 지속적으로 발생한다. 현재 공장들에서 많은 폐열은 대부분 활용되지 않은 채 외부로 방출되고 있으나, 이는 에너지 및 인프라 관점에서 비효율적인 구조이다. AWH 기술, 특히 흡습제 기반 시스템은 수분 탈착 (desorption) 단계에서 추가적인 열 에너지를 요구하므로, 공정 및 냉각 과정에서 발생하는 폐열을 연계 활용할 경우 물 재이용 확대에 따른 전력 소비 증가 문제를 구조적으로 완화할 수 있다. 따라서 용인 반도체 클러스터에서는 폐열을 활용한 물, 에너지 통합 인프라 관점에서 AWH 기술을 도입할 수 있으며, 폐열을 재사용하는 방향으로 해당 기술을 발전시켜야 한다.

6-3. 용인 반도체 클러스터의 폐열은 AWH뿐 아니라, 지역 차원의 냉난방 및 에너지 인프라와 연계하여 활용하는 방향으로 정책적으로 설계되어야 한다.

반도체 팹과 데이터센터에서 발생하는 폐열은 안정적이고 지속적인 특성을 가지며, 지역 냉난방과 같은 저온 열 수요를 충족하는 데 적합한 에너지원이다. 용인 반도체 클러스터에서도 폐열을 클러스터 내부 공정 보조 에너지로 한정하기보다는, 인근 주거, 상업 지역의 지역 냉난방 인프라와 연계함으로써 산업과 지역 사회가 동시에 혜택을 얻는 구조를 형성할 수 있다. 이러한 폐열 기반 지역 에너지 활용은 반도체 산업의 에너지 부담을 완화하는 동시에, 클러스터에 대한 지역 주민의 수용성을 제고하는 정책적 수단이 될 수 있다.

6-4. AWH 기술은 보조적 수자원 회수 옵션으로서 단계적 실증을 통해 도입되어야 한다.

AWH는 단독 수자원 공급 기술로서의 경제성에는 한계가 있으나, 반도체 클러스터에서 상시 발생하는 폐열을 활용할 수 있는 경우, 기존 재이용 인프라로 회수되지 않던 수증기 손실을 보완하는 실질적인 수단이 될 수 있다. 이에 따라 용인 반도체 클러스터에서는 AWH를 기존 수처리 기술의 대안으로 전면 도입하기보다, 폐열 활용 가능성을 전제로 한 조건부·보조적 기술로 정책적으로 위치 지을 필요가 있다.

특히 흡습제 성능 저하, 탈착 조건, 장기 운전 시 수질 안정성 등은 단기 실험만으로 평가하기 어려우므로, 대학과 연구기관을 핵심 파트너로 포함한 단계적 파일럿 실증을 통해 적용 가능성을 검증하는 접근이 바람직하다.

6-5. 용인 반도체 클러스터의 수자원 관리 정책에는 AI 기반 실시간 모니터링과 공정 최적화를 보조하는 의사결정 지원 체계를 단계적으로 도입할 필요가 있다.

반도체 제조 공정에서의 수자원 및 에너지 사용은 공정 조건, 장비 상태, 외기 환경 변화 등에 따라 시시각각 변동하며, 이러한 변동성은 기존의 고정된 운전 기준만으로는 충분히 대응하기 어렵다. 특히 수처리 공정에서는 유입 수질, 오염물 조성, 유량 변화가 동시에 발생하기 때문에, 단일 지표 기반의 운영 방식에는 구

조적인 한계가 존재한다.

AI 기반 데이터 분석 기술은 다양한 센서로부터 수집되는 수질, 유량, 압력, 에너지 사용 데이터를 통합 분석하여, 공정 이상 징후를 조기에 감지하고 운영자에게 대응 방향을 제시하는 보조적 의사결정 도구로 활용될 수 있다. 이는 수처리 공정을 자동으로 제어하는 개념이라기보다, 운영자의 판단을 데이터 기반으로 지원하는 체계에 가깝다. 용인 반도체 클러스터에서는 AI를 단독 제어 기술로 도입하기보다는, 기존 수처리·냉각 인프라의 운영 상태를 정밀하게 파악하고 의사결정을 지원하는 체계로 활용하며, 단계적인 적용을 통해 신뢰성을 확보하는 접근이 바람직하다.

6-6. AI 기반 최적화는 수자원·에너지 절감 목표를 직접 달성하는 수단이 아니라, 공정 복잡성을 관리하기 위한 보조적 인프라로 정책적으로 규정되어야 한다.

AI 기술은 대규모 데이터를 빠르게 분석하고 다양한 시나리오를 비교할 수 있다는 장점이 있으나, 반도체 제조와 같은 고위험·고정밀 산업에서 AI가 단독으로 의사결정을 수행하는 것은 현실적으로 제한적이다. 특히 수질 이상이나 공정 불안정은 즉각적인 공정 수율 저하로 이어질 수 있어, 최종 판단은 여전히 숙련된 운영자의 역할이 중요하다.

따라서 용인 반도체 클러스터에서는 AI를 효율 극대화 기술로 과도하게 강조하기보다는, 복잡한 공정 데이터를 구조화하고 운영자의 판단 정확도를 높이는 도구로 정책적으로 정의할 필요가 있다. 이는 AI 도입에 대한 현장의 거부감을 낮추고, 실제 운용 단계에서의 신뢰성을 확보하는 데에도 기여할 수 있다.

Amin Mojiri의 연구를 통해 확인된 바와 같이, 반도체 클러스터의 수자원 관리 정책은 액상 폐수 처리 중심 접근에서 벗어나, 공정·냉각·폐열·수증기 손실을 포함하는 통합 물-에너지 관리 프레임으로 확장될 필요가 있다. AWH와 AI 기술은 이러한 통합 인프라를 구성하는 보조적 수단으로서, 폐열 활용 가능성과 운영 안정성을 전제로 단계적으로 도입될 때 실질적인 정책 효과를 가질 수 있을 것이다.

iii. 탐사의 한계 및 추가 고찰

본 해외 탐사를 통해 반도체 클러스터의 에너지 및 수자원 운영과 관련된 핵심 쟁점을 다각도로 파악할 수 있었으나, 인터뷰 및 현장 접근의 특성상 일부 주제는 심층적으로 검증하거나 정량화하는 데 한계가 존재하였다. 이에 본 연구팀은 인터뷰 대상별로 탐사 과정에서 충분히 다루지 못했거나, 추가적인 분석이 필요하다고 판단된 영역을 중심으로 연구 공백 및 추가 고찰 사항을 다음과 같이 정리하였다.

1) Intel Chandler Campus 김종수 엔지니어 인터뷰를 계기로 도출한 전력 인프라 안정성 관점에서의 정량적 운영 기준 및 시스템 설계 연구 공백

1-1. 중앙집중형 반도체 클러스터 인프라의 운영 원리와 정량적 관리 기준

문헌 및 산업 보고서에 따르면, 반도체 클러스터의 중앙 유틸리티 시스템은 단순한 통합 공급 체계가 아니라, 정량적 품질 지표를 기반으로 한 실시간 감시 및 제어 시스템으로 구성된다. 수질의 경우 전기전도도(conductivity), 비저항(resistivity), 총유기탄소(TOC), 미립자 수 (particle count)가 핵심 관리 지표로 활용되며, 이들은 공정 요구 수준에 따라 매우 좁은 허용 범위 내에서 관리된다.

전력 인프라 역시 단순 공급 안정성뿐 아니라, 전압 변동, 주파수 안정성, 순간 정전(power sag)과 같은 품질 지표가 실시간으로 모니터링된다. 이러한 지표가 사전에 설정된 임계값을 초과할 경우, 자동 차단, 우회 공급, 비상 전원 전환과 같은 대응 시나리오가 즉각적으로 작동하도록 설계된다. 이와 같은 중앙집중형 관리 구조는 개별 펌 차원의 최적화보다 클러스터 전체의 공정 안정성을 우선시하며, 품질 저하나 이상 상황이 연쇄적으로 확산되는 것을 구조적으로 차단하는 역할을 수행한다.

1-2. 물 재이용률 지표의 해석 한계와 클러스터 물 수지 기반 목표 설정의 필요성

반도체 펌의 물 재이용률 목표를 설정할 때, 애리조나 사례에서 언급된 약 90%라는 수치를 그대로 적용하는 것은 적절하지 않다. 해당 수치는 초고순도수 자체의 재이용률이 아니라, 전체 취수량 대비 도시 수자원 시스템으로 반환되는 물의 비율을 의미하기 때문이다. 반도체 펌의 물 수지는 공정 사용, 냉각 및 HVAC에 따른 증발 손실, 내부 순환 재이용, 외부 반환량으로 구성되며, 이 중 증발 손실은

구조적으로 회수가 어려운 항목에 해당한다.

따라서 용인 반도체 클러스터에서는 단일 재이용률 목표를 설정하기보다, 공정과 용도별 구분된 단계적 재이용 목표를 설정하는 접근이 필요하다. 예를 들어 냉각수 및 설비 세정수와 같은 비초고순도 공정에서는 높은 재이용률을 목표로 설정할 수 있으나, 웨이퍼 세정과 같이 초고순도수가 직접 요구되는 공정에서는 보수적인 기준이 유지되어야 한다. 이러한 물 수지 기반 목표 설정은 재이용 확대와 공정 안정성 간의 균형을 확보하는 데 중요한 기준이 될 것이다.

1-3. 한국 기후 조건을 반영한 HVAC·냉각 인프라 설계 기준의 차별성

애리조나와 같은 고온 건조 지역과 달리, 한국은 사계절이 뚜렷하며 여름철 극고온, 겨울철 한파, 장마 및 태풍 등 다양한 극한 기후 조건이 반복적으로 발생하는 환경에 해당한다. 따라서 반도체 팹의 HVAC 및 냉각 시스템 설계 시 단일한 극한 조건이 아니라, 연간 발생할 수 있는 다양한 극한 시나리오를 동시에 고려한 설계 기준이 요구된다.

여름철에는 고온다습한 환경으로 인한 냉각 부하 증가와 냉각 효율 저하가 문제로 작용하며, 겨울철에는 한파로 인한 외부 설비 동결, 급격한 온도 변화에 따른 시스템 안정성 문제가 발생할 수 있다. 또한 태풍과 집중호우는 외부 전력 공급과 냉각 인프라의 물리적 안정성에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 환경적 특성은 냉각 설비의 중복성 확보, 여유 용량 설정, 비상 운전 시나리오 설계를 더욱 중요하게 만든다.

이와 같은 조건을 고려할 때, 용인 반도체 클러스터의 HVAC 및 냉각 인프라는 에너지 효율 극대화보다는 극한 기후 상황에서도 공정이 중단되지 않는 안정성 중심 설계를 우선 목표로 설정해야 하며, 이는 애리조나 사례와는 다른 방식의 capacity 기준 설정으로 이어질 필요가 있다.

2) Marisol Cira 박사(USC) 인터뷰 기반 미연구 영역 및 추가 고찰

Marisol Cira와의 인터뷰는 반도체 클러스터 수자원 재이용 문제의 구조적 특성을 이해하는 데 중요한 단서를 제공하였으나, 동시에 기존 연구 및 정책 논의에서 충분히 다루어지지 않은 몇 가지 공백 영역을 드러내는 계기가 되었다. 이에 본

팀은 인터뷰 이후 관련 학술 자료와 해외 사례를 추가로 검토하여, 다음과 같은 미연구 영역을 보완적으로 정리하였다.

2-1. 초고순도 수자원 재이용 과정에서 미생물 잔존의 장기적 영향에 대한 정량적 기준 부재

추가적인 문헌 조사 결과, 현재 고순도 수자원 재이용 분야에서는 미생물 잔존 여부를 주로 음용수 안전성 또는 공중보건 관점에서 평가하는 경향이 강하며, 반도체 공정 수준에서 요구되는 초고순도 환경을 전제로 한 생물학적 리스크 기준은 체계적으로 정립되지 않은 것으로 확인되었다.

일반적인 하수, 폐수 재이용 및 간접 음용 재이용(IPR) 시스템에서는 미생물 농도를 총대장균군, HPC(Heterotrophic Plate Count) 등의 지표로 관리하고 있으나, 이러한 지표는 반도체 공정에서 문제가 되는 biofouling 유발 가능성, 미량 유기물과의 상호작용, 막 표면에서의 장기적 biofilm 형성 가능성을 직접적으로 반영하지 못한다는 한계가 있다.

특히 UF 및 고도 정수 공정의 경우, 단기적인 수질 기준을 충족하더라도 미량의 미생물이 장기간 잔존할 경우 막 표면에서 점진적인 biofouling이 누적될 수 있으며, 이는 막 차압 상승, 에너지 소비 증가, 막 수명 단축으로 이어질 수 있다. 그럼에도 불구하고, 현재까지 반도체 공정에 허용 가능한 미생물 수준이 어느 정도인가에 대한 정량적 기준은 명확히 제시되지 않고 있다.

이러한 공백은 반도체 클러스터 차원의 수자원 재이용 시스템 설계 시, 기술적 안전 마진을 과도하게 설정하거나 반대로 리스크를 과소평가하는 결과로 이어질 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 단순한 미생물 제거율이 아니라, 장기 운영 조건에서의 biofouling 발생 가능성과 공정 안정성 간의 상관관계를 정량적으로 평가할 수 있는 기준 마련이 요구된다.

2-2. 클러스터 단위 수자원 재이용 시스템에서 에너지 회수 효과에 대한 실증 데이터 부족

추가적인 자료 조사를 통해 확인된 또 다른 공백은, 혐기성 공정을 포함한 수자원 재이용 시스템에서 에너지 회수 효과가 실제로 어느 정도까지 에너지를

상쇄할 수 있는지에 대한 실증 데이터가 제한적이라는 점이다.

혐기성 막 생물반응기(AnMBR) 및 유사 공정은 이론적으로 폭기 에너지를 제거하고, 바이오가스를 통해 에너지를 회수할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나 기존 연구의 상당수는 실험실 또는 파일럿 규모에서의 에너지 수지 분석에 머물러 있으며, 클러스터 단위와 같이 대규모·연속 운전 환경에서의 순 에너지(Net Energy) 효과를 장기간 검증한 사례는 상대적으로 부족한 것으로 나타났다.

특히 반도체 클러스터에서는 수질 변동성이 크지 않다는 장점이 있는 반면, 공정 중단이 허용되지 않는 특성상 에너지 회수 공정의 안정성, 유지관리 비용, 비상 운전 조건 등이 에너지 수지에 큰 영향을 미칠 수 있다. 그러나 이러한 요소를 포함한 통합적 에너지 평가 모델은 아직 충분히 축적되지 않았다.

이로 인해 물-에너지 통합 전략은 개념적으로는 설득력을 가지지만, 정책 결정 단계에서는 실증 근거 부족으로 인해 보수적으로 접근될 가능성이 크다. 따라서 향후에는 클러스터 단위 수자원 재이용 시스템을 대상으로, 에너지 회수 효과와 추가 에너지 투입 요소를 함께 고려한 장기 실증 연구가 필요할 것으로 판단된다.

2-3. 수질 안정성-막 수명-에너지 소비-운영 비용을 통합적으로 평가하는 시스템 모델의 부재

추가 조사 결과, 현재 수자원 재이용 분야의 연구는 대체로 개별 요소 중심으로 이루어지고 있으며, 수질 안정성, 막 수명, 에너지 소비, 운영 비용 간의 상호작용을 하나의 시스템으로 통합하여 평가하는 접근은 제한적인 것으로 확인되었다.

예를 들어, 막 수명 연장을 위해 보다 엄격한 전처리 공정을 도입할 경우, 단기적으로는 에너지 소비와 운영 비용이 증가할 수 있다. 반대로, 에너지 소비를 최소화하기 위해 전처리를 단순화할 경우, 장기적으로는 막 교체 주기 단축과 유지관리 비용 증가로 이어질 가능성이 있다. 이러한 상충 관계는 개별 연구에서는 부분적으로 다루어지고 있으나, 클러스터 단위 의사결정을 지원할 수 있는 통합 평가 모델로는 충분히 정리되지 않았다.

특히 반도체 클러스터와 같이 초기 설계 단계에서의 의사결정이 수십 년간의 운영 비용과 안정성을 좌우하는 경우, 이러한 통합 모델의 부재는 기술적 불확실성을 증폭시키는 요인으로 작용한다. 이는 정책 결정자와 산업 주체가 장기적 관

점에서 최적의 선택을 내리는 데 있어 중요한 제약 요소가 된다.

따라서 향후 연구에서는 개별 공정 성능 평가를 넘어, 클러스터 단위 수자원 재이용 시스템을 하나의 동적 시스템으로 모사할 수 있는 통합 모델 구축이 요구된다. 이는 기술 개발뿐 아니라, 정책 수립과 투자 우선순위 설정을 지원하는 핵심 도구로 기능할 수 있을 것이다.

3) Golwala 박사(USC) 인터뷰 기반 미연구 영역 및 추가 고찰

3-1. 미생물 기반 전처리 공정에서의 비전통 미량오염물질 리스크 반영 부족

추가적인 문헌 조사 결과, 미생물 기반 수처리 공정에서 항생제 내성 유전자(ARG) 및 미세플라스틱과 같은 미량오염물질의 거동은 환경공학 분야에서는 점차 연구가 확대되고 있는 반면, 반도체 산업을 대상으로 한 수자원 재이용 논의에서는 거의 반영되지 않고 있음이 확인되었다.

일반적인 반도체 수자원 재이용 연구는 전통적으로 TOC, TDS, 이온 성분, 금속류와 같은 물리·화학적 지표에 초점을 맞추어 왔다. 그러나 최근 환경공학 및 공중보건 분야에서는 미생물 기반 공정 내에서 항생제 내성 유전자가 장기간 축적되거나, 미세플라스틱 표면에 바이오필름이 형성되어 유전물질의 이동 매개체로 작용할 가능성이 제기되고 있다. 이러한 현상은 단기적인 공정 수질에는 큰 영향을 미치지 않을 수 있으나, 장기적인 공정 안정성 및 환경·보건 리스크 측면에서는 잠재적 위험 요소로 작용할 수 있다.

특히 AnMBR과 같이 고형물 체류 시간이 매우 긴 공정의 경우, 미생물 군집 구조와 미량오염물질의 상호작용이 기존 호기성 공정과 다르게 나타날 가능성이 있음에도 불구하고, 반도체 재이용수 맥락에서 이를 체계적으로 분석한 연구는 제한적이다. 이는 향후 반도체 클러스터 수자원 재이용 시스템을 설계할 때, 수질 기준을 넘어선 생물학적 안전성 평가 지표 도입의 필요성을 시사한다.

3-2. AnMBR 전처리수와 후단 UF·RO·UPW 공정 간 단계 간 상호작용 정량 분석 부족

추가 자료 조사를 통해 확인된 또 다른 중요한 공백은, AnMBR 처리수가 후단 UF·RO·UPW 공정에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구가 매우 제한적이라

는 점이다. 현재까지의 반도체 수자원 재이용 연구는 대부분 “전처리-고도처리-초순수 생산”이라는 단계적 구조를 전제로 하면서도, 각 단계 간의 상호작용을 독립적으로 분석하는 경향이 강하다.

그러나 문헌 검토 결과, 전처리 단계에서의 유기물 특성, 미세입자 분포, 생물학적 잔존물은 후단 막 공정의 막 오염 특성, 세정 주기, 에너지 소비에 직접적인 영향을 미칠 수 있음이 다양한 수처리 사례에서 보고되고 있다. 특히 AnMBR 처리수는 일반적인 활성슬러지 기반 처리수와 비교했을 때, 용존 유기물의 성상과 미생물 유래 물질(EPS, SMP 등)이 상이할 가능성이 있음에도 불구하고, 이러한 차이가 반도체 초순수 공정에 미치는 영향을 다룬 연구는 거의 찾아보기 어렵다.

이는 향후 반도체 클러스터 차원의 재이용 시스템을 설계할 때, AnMBR을 단순한 전처리 대체 기술로 보는 접근에서 벗어나, 전처리수의 특성이 후단 공정 전반에 어떤 영향을 미치는지를 통합적으로 분석하는 연구가 필요함을 시사한다. 다시 말해, 공정 간 연계를 고려한 시스템 단위 성능 평가 프레임워크가 요구되는 지점이다.

3-3. 수자원 회수와 에너지 회수를 동시에 고려한 클러스터 단위 통합 최적화 모델 부재

마지막으로, 탐사 이후 추가적인 정책 보고서 및 해외 사례 분석을 통해, 에너지 회수량과 수자원 회수율을 동시에 고려한 클러스터 단위 최적화 모델이 아직 체계적으로 제시되지 않았다는 점이 확인되었다. 현재 반도체 산업에서는 에너지 관리와 수자원 관리를 개별적인 문제로 접근하는 경우가 많으며, 이로 인해 공정 간 최적화보다는 부분 최적화에 그치는 사례가 다수 존재한다.

반면, 환경공학 및 지속가능 인프라 분야에서는 수처리 공정을 에너지 소비 시설이 아닌 에너지 생산 및 자원 회수 인프라로 재해석하려는 시도가 점차 확대되고 있다. 그러나 이러한 접근이 반도체 클러스터라는 고도 산업 인프라에 적용될 경우, 공정 안정성, 수질 요구 수준, 운영 리스크 등을 동시에 고려해야 하기 때문에 보다 정교한 최적화 모델이 요구된다.

특히 클러스터 단위에서는 개별 펌프의 물 수요, 에너지 수요, 공정 특성이 상이하므로, 이를 통합적으로 고려한 다목적 최적화(multi-objective optimization) 모델

이 필요하다. 에너지 회수량, 수자원 회수율, 공정 안정성, 비용, 리스크를 동시에 고려하는 모델은 향후 반도체 산업과 환경공학 분야 간 융합 연구의 중요한 방향이 될 수 있다.

4) 이상석 박사님 인터뷰 기반 멤브레인 중심 수처리 공정의 장기 운전 안정성과 클러스터 규모 적용 검증 공백 정리

본 해외 탐사를 통해 반도체 폐수 재활용 공정에서의 주요 기술적 병목과 전반적인 연구 방향성은 확인할 수 있었으나, 인터뷰 과정에서 중요성이 강조된 다수의 요소들은 아직 반도체 클러스터 규모 적용을 전제로 한 충분한 검증이 이루어지지 않은 상태로 남아 있다. 특히 이상석 박사 인터뷰에서 제기된 문제의식은, 기존 연구가 개별 공정 또는 단기 성능 평가에 치우쳐 있었음을 드러내며, 장기 운전과 대규모 적용을 고려한 추가 연구의 필요성을 분명히 한다.

4-1. 난분해성 유기물-멤브레인 간 장기 상호작용에 대한 연속 운전 검증 부족

난분해성 유기물 처리는 반도체 폐수 재활용 공정에서 가장 큰 병목으로 지적되고 있으나, 신규 포토레지스트 및 특수 화학물질이 멤브레인 표면 특성, 파울링 거동, 분리 성능에 미치는 장기적 영향에 대한 데이터는 충분히 축적되지 않았다. 특히 단기 실험이나 간헐적 운전 조건이 아닌, 장기 연속 운전 조건에서 오염물질의 누적 효과가 멤브레인 성능 저하로 어떻게 연결되는지에 대한 정량적 분석이 요구된다.

4-2. RO 멤브레인 개질 기반 공정 집약화 전략의 산업 규모 스케일업 불확실성

RO 멤브레인 개질을 통해 난분해성 유기물을 동시 제거하고 전처리 공정을 단순화할 수 있는 가능성은 제시되었으나, 대규모 처리량과 유입 부하 변동이 상시 존재하는 반도체 클러스터 환경에서도 동일한 성능과 운전 안정성을 유지할 수 있는지에 대한 실증 연구는 부족하다. 이는 실험실 또는 파일럿 수준에서 확인된 성과가 산업 규모로 확장될 수 있는지 판단하기 위한 핵심 공백으로 남아 있다.

4-3. 용스트림 단위 미량 불순물 제거 기술 간 비교·선택 기준의 부재

요소(urea) 및 질소계 미량 물질과 같이 기존 RO 공정으로는 제거 한계가 존재하는 옹스트롬 단위 불순물의 중요성이 강조되었음에도 불구하고, 이를 보완할 수 있는 대체 또는 보조 기술 간의 성능, 에너지 소비, 비용 구조를 종합적으로 비교·평가한 연구는 충분하지 않다. 이는 UPW 품질 고도화를 위한 기술 선택 과정에서 객관적 판단 근거가 부족함을 의미한다.

4-4. UF 멤브레인 기공 분포 불균일성과 장기 분리 안정성 간 연계 지표 부족

평균 기공 크기보다 기공 구조의 불균일성이 실제 분리 성능과 신뢰성에 더 중요한 설계 요소로 언급되었으나, 이러한 특성이 장기 운전 시 분리 안정성과 최종 UPW 수질에 어떤 영향을 미치는지를 체계적으로 평가할 수 있는 지표와 검증 체계는 아직 확립되지 않았다. 이는 멤브레인 설계 기준을 고도화하는 데 있어 중요한 연구 공백으로 작용한다.

4-5. CMP 폐수 조건에서 장기 분리 안정성을 기준으로 한 실증 데이터 부족

나노 입자와 유기물이 동시에 존재하는 CMP 폐수에서는 순간 투과량보다 장기적인 분리 안정성이 핵심 성능 지표로 제시되었으나, 이러한 기준을 실제 공정 조건에 적용해 검증한 장기 실증 데이터는 제한적인 상황이다. 클러스터 단위 적용을 위해서는 실제 운전 조건을 반영한 지속적 검증이 필요하다.

4-6. 파울링 지연 전략의 경제성·수명 효과에 대한 시스템 단위 평가 공백

파울링을 완전히 제거하기보다 발생 시점을 지연시키는 전략이 현실적인 대안으로 제시되었으나, 해당 전략이 화학 세정 비용, 멤브레인 교체 주기, 총 운전 비용에 미치는 영향을 종합적으로 평가한 파일럿 규모 데이터는 부족하다. 이는 장기 운전 관점에서 해당 전략의 실질적 효과를 판단하는 데 한계를 초래한다.

4-7. AI·디지털 트윈 기반 수처리 운영 기술의 실제 적용 조건 불확실성

스마트 센서와 AI·머신러닝을 활용한 파울링 예측 및 선제 대응의 필요성은 확인되었으나, 이를 반도체 클러스터에 적용하기 위해 요구되는 데이터 수집 수준, 센서 밀도, 시스템 구축 비용과 경제성에 대한 분석은 추가적인 연구 과제로

남아 있다.

종합적으로 볼 때, 이상석 박사 인터뷰를 통해 도출된 미연구 영역들은 반도체 폐수 재활용 문제를 단기 성능 중심의 기술 개발 차원에서 벗어나, 장기 운전 안정성과 클러스터 규모 적용 가능성을 중심으로 재정의해야 함을 시사한다. 이러한 연구 공백을 체계적으로 보완하는 것이 향후 반도체 수자원 재이용 기술과 정책의 실효성을 결정짓는 핵심 과제가 될 것이다.

5) Binglin Guo 박사 인터뷰 기반 PFAS를 중심으로 한 반도체 공정수 재이용 시스템의 한계 오염물질 관점 미연구 영역 정리

이번 USC 전문가 인터뷰와 현장 탐사는 반도체 공정수 재이용과 PFAS 문제의 구조적 중요성을 분명히 드러냈지만, 동시에 기존 연구 및 본 탐사 범위 내에서 충분히 다루지 못한 다수의 미연구 영역을 확인하는 계기가 되었다. 이는 향후 기술 연구뿐 아니라 정책 설계와 인프라 구축 단계에서 추가적인 검토가 요구되는 핵심 공백으로 작용한다.

5-1. 반도체 공정별 PFAS 발생 특성과 유입 경로에 대한 정량 데이터 부족

이번 탐사는 주로 공정수 재이용 및 사후 처리 관점에서 PFAS 문제를 논의했으나, 실제 반도체 제조 공정 내부에서 PFAS가 어떤 공정 단계에서, 어떤 형태로, 어떤 농도 범위로 발생·유입되는지에 대한 정량적 분석은 충분히 이루어지지 않았다. 이는 PFAS 문제를 사후 처리 기술에만 의존하게 만드는 구조적 원인으로, 향후에는 공정 단계별 발생 억제(source control) 가능성을 평가하기 위한 기초 데이터 축적이 필요하다.

5-2. 반도체 폐수 조건에서 PFAS 전구체의 전환 거동 및 장기 축적 효과에 대한 연구 부족

인터뷰에서는 전구체 PFAS가 처리 과정 중 새로운 PFAS로 전환될 수 있다는 점이 언급되었으나, 실제 재이용 시스템의 연속 운전 조건에서 이러한 전환이 어떻게 누적되고 시스템 내에 축적되는지에 대한 실증적 연구는 부족하다. 특히 재이용 공정의 반복 운전이 PFAS 조성 변화를 어떻게 증폭 또는 완화하는지에 대한

장기적 관점의 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있다.

5-3. PFAS 제거 공정에서 발생하는 2차 폐기물의 최종 처리 경로 및 환경 영향 평가 미흡

흡착제나 멤브레인에 농축된 PFAS를 어떻게 최종적으로 처리할 것인지, 해당 처리 과정에서 추가적인 환경 부하나 에너지 소비가 얼마나 발생하는지에 대한 정량적 비교 연구는 충분하지 않다. 이는 제거 기술의 ‘성공’을 공정 내 제거율로만 평가하는 한계를 보여주며, 시스템 전체 생애주기 관점(LCA)의 평가 필요성을 시사한다.

5-4. PFAS 분석 기술의 한계가 정책·기술 의사결정에 미치는 구조적 영향 분석 부족

검출 한계, 표준물질 부족, 논타겟 분석의 불확실성은 단순한 기술적 문제를 넘어 규제 기준 설정과 기술 적용 판단 자체를 제약하는 요소로 작용한다. 그러나 이러한 분석 불확실성이 정책 설계와 기술 선택 과정에 어떤 구조적 왜곡을 초래하는지에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 상황이다.

5-5. PFAS 대응 기술의 에너지 소비가 반도체 클러스터 인프라에 미치는 장기적 영향 분석 부족

PFAS 제거 공정은 필연적으로 고에너지 투입을 수반하지만, 이를 반도체 클러스터 전체 에너지 수요 증가, 탄소 배출, 전력·수자원 인프라 확장 필요성과 연계해 평가한 연구는 제한적이다. 이는 PFAS 문제를 Water-Energy Nexus 관점에서 통합적으로 다뤄야 할 필요성을 더욱 분명히 보여준다.

종합적으로 볼 때, 이번 탐사를 통해 확인된 미연구 영역들은 PFAS 문제를 개별 처리 기술의 한계로 축소해서는 안 되며, 반도체 공정 설계, 분석 인프라, 폐기물 관리, 에너지 정책을 포괄하는 통합 연구 주제로 확장해야 함을 시사한다. 이러한 공백을 체계적으로 보완하는 것이 향후 반도체 공정수 재이용 정책과 기술 개발의 실효성을 좌우할 핵심 과제가 될 것이다

6) Arizona State University Amin Mojiri 교수님 인터뷰 기반 추가 고찰

6-1. 반도체 수처리 핵심 공정 원리 및 예상 수처리 시나리오 분석

UF(Ultrafiltration)는 물리적인 막 여과를 이용한 수처리 공정으로, 분자량 컷오프(MWCO)를 기준으로 미세 입자, 콜로이드, 박테리아, 일부 고분자 유기물을 제거한다. 이 과정에서 이온이나 저분자 유기물은 막을 통과하기 때문에, UF는 물을 완전히 정제하기보다는 입자와 탁도를 제거하는 역할에 가깝다. 반도체 수처리 시스템에서는 주로 RO 공정의 앞단에 위치하여, 원수에 포함된 입자성 오염물질을 제거함으로써 이후 공정에서 발생할 수 있는 막 오염(fouling)을 방지하는 전처리 단계로 활용된다. 즉 UF는 물을 깨끗하게 만드는 공정보다는, 다음 단계의 안정적인 운전을 보호하는 역할을 수행한다.

RO(Reverse Osmosis)는 삼투압보다 높은 압력을 가해 물 분자만을 선택적으로 통과시키는 막 분리 공정으로, 이온, 염류, 대부분의 용존 유기물을 효과적으로 제거할 수 있다. 담수화 및 고순도수 제조의 핵심 기술로 활용되며, 높은 압력이 필요하기 때문에 에너지 소비가 크다는 특징을 가진다. 반도체 산업에서는 재이용수의 기본적인 수질을 확보하는 핵심 공정으로 사용되며, 초고순도수(UPW) 생산을 위한 전단 공정으로서 중요한 역할을 한다. 이러한 이유로 RO는 반도체 수처리 시스템의 core에 해당하는 공정으로 볼 수 있다.

Ion exchange 공정은 이온 교환 수지(resin)를 이용해 물 속의 특정 이온을 선택적으로 제거하는 방식이다. 수지에 결합된 이온과 물 속의 이온이 자리를 바꾸는 원리를 이용하며, Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- 등 특정 양이온과 음이온을 효과적으로 제거할 수 있다. 선택적 제거가 가능하다는 장점이 있지만, 수지의 성능 유지를 위해 산이나 염기를 이용한 재생 과정이 필요하다. 반도체 수처리 시스템에서는 RO 이후 단계에서 초미량 이온을 제거하는 데 사용되며, 초고순도수 품질을 최종적으로 마무리하는 정밀 조정 단계에 해당한다.

AOP(Advanced Oxidation Processes)는 강력한 산화종인 수산화 라디칼($\cdot\text{OH}$)을 생성해 오염물질을 분해하는 고도 수처리 공정이다. 대표적인 방식으로는 자외선(UV), 오존(O_3), UV/ H_2O_2 조합 등이 있으며, RO 공정으로도 제거가 어려운 미량 유기물, VOCs, 난분해성 화합물을 효과적으로 처리할 수 있다. 단순히 오염물을

분리하거나 제거하는 방식이 아니라, 화학적으로 분해(destruction)하는 공정이라는 점이 특징이며, 그만큼 에너지 소모가 크다. 반도체 산업에서는 TOC 관리와 유기 오염 리스크 제거를 위해 활용되며, 수처리 공정에서 마지막까지 남아 있는 유기물을 처리하는 핵심 역할을 수행한다.

반도체 수처리 시스템에서는 이러한 UF, RO, ion exchange, AOP와 같은 고도처리 공정이 단계적이고 복합적으로 운영되고 있다. 이러한 공정들은 각각 제거 가능한 오염물의 종류와 한계가 명확히 구분되어 있으며, 실제 운용에서는 초고순도수(UPW) 요구 수준과 재이용 목적에 따라 공정 조합과 운전 조건이 설정된다. 다만, 반도체 공정별로 허용 가능한 수질 기준과 재이용 한계에 대한 정량적 수치와 운전 프로토콜은 기업 내부 기준으로 관리되는 경우가 많아 외부에 공개되어 있지 않다. 그 결과 외부 연구나 탐사에서는 각 수처리 공정이 어떤 원리로 작동하는지는 파악할 수 있었으나, 실제 현장에서 어떤 수질 기준을 만족시키기 위해 어느 수준까지 공정을 가동하는지에 대한 데이터 기반 분석에는 한계가 존재한다.

따라서 본 연구에서는 개별 수처리 공정의 제거 원리를 기반으로, 초고순도수 요구 수준과 재이용 목적에 따라 가능한 공정 운용 시나리오를 설정하고 이를 개념적으로 분석하는 접근을 아래와 같이 시도해볼 수 있었다.

시나리오 1은 웨이퍼 세정과 같이 초고순도수가 직접적으로 요구되는 공정을 대상으로 한 경우이다. 이 경우 미세 입자, 이온, 유기물 중 어느 하나라도 허용 한계를 초과할 경우 공정 수율에 즉각적인 영향을 미칠 수 있으므로, UF를 통해 입자와 탁도를 제거한 후 RO로 이온과 염류를 저감하고, AOP를 적용해 난분해성 유기물을 분해한 뒤 ion exchange를 통해 초미량 이온을 최종적으로 제거하는 보수적인 공정 조합이 필요할 것으로 판단된다. 이는 재이용수의 공정 투입 가능성을 최대한 안전하게 확보하기 위한 시나리오로, 에너지 및 비용 부담은 크지만 공정 안정성을 최우선으로 고려한 운용 방식에 해당한다.

시나리오 2는 냉각수, 설비 세정수, 스크러버 보충수 등 상대적으로 수질 요구 수준이 낮은 공정을 대상으로 한 경우이다. 이러한 경우에는 UF와 RO 중심의 공정 조합만으로도 재이용이 가능할 수 있으며, 유기 오염 리스크가 상대적으로 낮다면 AOP는 선택적으로 적용될 수 있다. 이 시나리오는 초고순도수 공정과 명확히 분리된 용도를 전제로 하여 재이용률을 높이고, 동시에 에너지 소비와 운영 부

담을 줄이는 데 초점을 둔 운용 방식이다.

시나리오 3은 VOCs나 용매류 등 유기 오염물 비중이 큰 공정 폐수를 재이용 대상으로 고려하는 경우이다. 이 경우 RO 공정만으로는 제거가 어려운 난분해성 유기물이 주요 리스크 요인이 되므로, UF 이후 AOP를 우선 적용해 유기물을 분해한 뒤 RO와 ion exchange를 후단에 배치하는 공정 조합이 필요할 수 있다. 이는 공정 특성에 따라 고도 처리 공정의 적용 순서가 달라질 수 있음을 보여주는 사례이다.

이와 같이 반도체 수처리 공정은 단일한 고정 프로토콜로 운영되기보다는, 초고 순도수 요구 수준과 재이용 목적, 그리고 오염물 조성에 따라 공정 조합과 운전 전략이 달라지는 구조를 가진다. 실제 운전 기준이 외부에 공개되지 않는 상황에서 이러한 시나리오 기반 접근은, 고도 수처리 공정의 역할과 한계를 이해하기 위한 현실적인 분석 방법으로 의미를 가진다.

6-2. 오염원 분리(Source separation)의 중요성과 적용 공백

반도체 수처리에서 Source separation이란, 서로 다른 화학적 성상과 오염물 특성을 가진 폐수를 처리 단계 이전, 즉 발생 단계에서부터 분리하여 관리하는 개념을 의미한다. 반도체 제조 공정에서는 공정 종류와 사용 화학물질에 따라 배출되는 폐수의 조성, 농도, 변동성이 크게 달라지기 때문에, 이를 하나의 스트림으로 혼합해 처리할 경우 수처리 난이도가 급격히 증가하게 된다. 따라서 오염원 분리는 개별 수처리 공정의 성능 이전에, 전체 수처리 시스템의 효율성과 안정성을 좌우하는 핵심 설계 요소로 작용한다.

실제 반도체 팹에서는 여러 기준에 따라 오염원 분리가 이루어진다.

가장 기본적인 방식은 공정별 배관 분리로, 웨이퍼 세정, 식각, CMP, 스크러버 등 서로 다른 공정에서 발생하는 폐수를 초기 단계부터 별도의 배관을 통해 분리 수집하는 방식이다. 각 공정은 배출되는 오염물의 성상이 크게 다르기 때문에, 공정 단위 분리는 이후 수처리 공정 설계를 단순화하는 데 기여한다.

정밀한 분리 방식으로는 화학군 기반 분리가 있다. 불소계 화합물, 유기 용매류, 금속 이온 함유 폐수 등 주요 오염물의 화학적 특성을 기준으로 스트림을 구분함으로써, 각 오염물에 적합한 처리 기술을 선택적으로 적용할 수 있다. 또한 고농

도, 저농도 스트림 분리는 소량이지만 처리 난이도가 높은 고농도 폐수와, 대량이지만 상대적으로 오염 수준이 낮은 폐수를 분리해 관리하는 방식으로, 전체 시스템의 과도한 고도 처리를 방지하는 데 중요한 역할을 한다.

최근에는 재이용 목적을 기준으로 한 분리 방식도 활용되고 있으며, 초고순도수 재이용 가능 스트림, 냉각수나 설비 세정수 재이용 후보 스트림, 방류 전용 스트림을 사전에 구분함으로써, 각 스트림에 요구되는 수질 수준에 맞춘 수처리 공정 조합을 적용할 수 있다.

오염원 분리가 이루어지지 않고 서로 다른 성상의 폐수가 혼합될 경우, 수처리 시스템은 가장 처리 난이도가 높은 오염물 기준으로 설계될 수밖에 없다. 이로 인해 RO, AOP와 같은 에너지 소모가 큰 고도 처리 공정이 불필요하게 확대 적용되며, 운영 비용과 에너지 소비가 크게 증가한다. 또한 혼합된 폐수는 오염물 조성의 변동성이 커져 공정 제어가 어려워지고, 재이용 가능성이 낮아져 결국 방류 중심의 운영으로 귀결될 가능성이 높아진다.

반면 오염원 분리가 적절히 이루어질 경우, 각 스트림의 특성에 맞는 공정 조합과 운전 전략을 설정할 수 있어 수처리 효율이 크게 향상된다. 고농도, 고위험 스트림은 집중적으로 고도 처리하고, 상대적으로 깨끗한 스트림은 최소한의 공정만으로 재이용할 수 있어 전체 재이용률이 증가한다. 또한 불필요한 과잉 처리(over-treatment)를 방지함으로써 에너지 소비와 운영 부담을 줄일 수 있으며, 수처리 시스템의 안정성과 예측 가능성도 함께 향상된다. 이러한 점에서 오염원 분리는 개별 처리 기술의 한계를 보완하고, 반도체 수자원 인프라를 재이용 중심으로 전환하는 데 필수적인 구조적 요소라 할 수 있다.

6-3. 반도체 클러스터에서 비공정 수자원(non-process water)의 규모와 관리 체계

본 탐사를 통해 반도체 수자원 관리 논의가 초고순도수(UPW) 생산과 공정 폐수 재이용을 중심으로 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 실제 반도체 클러스터 운영에서는 공정 외 영역에서 사용되거나 손실되는 비공정 수자원의 비중 또한 매우 크며, 이에 대한 정량적 분석과 관리 체계는 상대적으로 충분히 구축되어 있지 않다. 이러한 비공정 수자원은 공정 수율에 직접적인 영향을 미치지 않는

다는 이유로 관리 우선순위에서 밀려나 왔으나, 클러스터 단위의 총 물 사용량과 수자원 리스크를 평가하는 데 있어서는 핵심적인 요소에 해당한다.

대표적인 비공정 수자원 사용처로는 냉각탑 보충수(make-up water), 공정 스크러버 세정수, 공조(HVAC) 시스템에서 발생하는 응축수, 설비 유지보수 과정에서 사용되는 세정수 등이 있다. 이들 수자원은 공정용수와 달리 초고순도 수준의 수질이 요구되지 않음에도 불구하고, 대량으로 소비되거나 증발 손실 형태로 사라지는 경우가 많다. 특히 냉각탑의 경우, 열 방출을 위해 물의 증발을 의도적으로 활용하는 구조이기 때문에 클러스터 전체 수자원 손실의 상당 부분을 차지한다.

실제 조사 사례를 보면, 대규모 반도체 팹과 데이터센터가 밀집한 지역에서는 냉각탑에서 사용되는 물이 전체 물 사용량의 30-50% 수준에 이르는 것으로 보고된다. 예를 들어, 미국 애리조나 지역에 위치한 Intel의 Fab 운영 사례에서는 냉각탑 보충수가 전체 산업용수 소비에서 매우 큰 비중을 차지하며, 고온·건조한 기후 조건에서는 증발 손실이 더욱 확대되는 것으로 알려져 있다. 이러한 물은 대부분 회수되지 않고 대기로 손실되며, 기존 UPW 재이용 시스템이나 폐수 처리 체계의 관리 범위에는 포함되지 않는다.

공조(HVAC) 시스템에서 발생하는 응축수 역시 중요한 비공정 수자원이다. 데이터센터 및 클린룸 환경에서는 온·습도 제어를 위해 지속적인 공조 운전이 필요하며, 이 과정에서 상당량의 응축수가 발생한다. 해외 일부 데이터센터에서는 이 응축수를 냉각탑 보충수나 조경용수로 재이용하는 사례가 보고되고 있으나, 반도체 팹에서는 수질 관리 기준과 운영 안정성 문제로 인해 여전히 대부분 배출되고 있다. 이는 비교적 낮은 오염 수준을 가진 물임에도 불구하고, 재이용 가능성이 충분히 검토되지 않았음을 의미한다.

스크러버 세정수 또한 비공정 수자원의 중요한 구성 요소이다. 반도체 공정에서 발생하는 산성 가스, 불소계 화합물, 유기 용매 증기를 제거하기 위해 대규모 습식 스크러버가 사용되며, 이 과정에서 지속적인 물 공급이 필요하다. 스크러버 세정수는 오염물 농도가 비교적 높고 조성이 복잡해 재이용이 쉽지 않다는 이유로 대부분 폐수로 분류되지만, 발생량 자체가 매우 크기 때문에 전체 수자원 관리 관점에서는 무시하기 어려운 비중을 차지한다.

탐사 과정에서 확인한 바와 같이, 이러한 비공정 수자원은 기존 UPW 재이용

시스템의 관리 범위에 포함되지 않는 경우가 많아, 클러스터 전체 수자원 수지(water balance)를 평가할 때 체계적으로 반영되지 못하는 한계가 존재한다. 그 결과 반도체 클러스터의 실제 물 소비 구조는 공정 중심으로 단순화되어 해석되며, 냉각·공조·배출 영역에서의 구조적인 손실은 과소평가된다. 이는 가뭄이나 수자원 공급 불안정과 같은 외부 리스크가 발생할 경우, 클러스터의 취약성을 정확히 예측하기 어렵게 만드는 요인으로 작용한다.

따라서 향후 연구에서는 공정용수와 비공정용수를 명확히 구분한 클러스터 단위의 수자원 수지 분석이 필요하며, 특히 냉각탑, HVAC, 스크러버 등 주요 비공정 수자원 사용 지점을 중심으로 물 사용량과 손실 구조를 정량화하는 접근이 요구된다. 이는 기존의 공정 수처리 효율 개선 중심 논의를 넘어, 반도체 클러스터 전체를 하나의 통합 수자원 시스템으로 이해하기 위한 기초 작업에 해당할 것이다.

6-4. 반도체 냉각 인프라와 수자원 관리의 결합 지점에 대한 분석 부족

반도체 팹과 데이터센터의 냉각 시스템은 수자원과 에너지가 동시에 집중되는 핵심 인프라임에도 불구하고, 실제 설계와 운영에서는 수처리 공정과 분리된 독립 영역으로 취급되는 경우가 일반적이다. 냉각탑과 증발식 냉각 시스템은 대량의 물을 증발시켜 열을 방출하는 구조를 기반으로 하며, 이 과정에서 발생하는 수증기 손실은 현재 대부분 불가피한 손실로 간주되어 회수 또는 관리 대상에서 제외되고 있다.

실제 조사에 따르면, 대규모 반도체 팹과 데이터센터에서는 냉각 관련 용수가 전체 물 사용량의 상당 부분을 차지하며, 특히 고온·건조 지역에서는 냉각탑 증발 손실이 물 소비 구조의 핵심 요소로 작용한다. 예를 들어, Intel과 TSMC가 운영 중인 대형 팹에서는 공정 효율과 장비 안정성을 유지하기 위해 냉각 성능을 최우선으로 설계하며, 그 결과 물 소비량 증가와 증발 손실은 일정 부분 감수되는 구조를 가진다. 이처럼 냉각 인프라는 공정 안정성과 직결되기 때문에, 수자원 절감보다는 열 제거 성능과 운전 신뢰성이 우선시되어 왔다.

탐사 과정에서 접한 AWH 기반 연구들은 냉각 과정에서 발생하는 수증기를 잠재적인 수자원으로 인식하고 이를 회수 대상으로 제안하지만, 실제 반도체 클러스

터 설계 단계에서 냉각 인프라와 수자원 회수 시스템을 통합적으로 고려한 사례는 매우 제한적이었다. 이는 냉각 설비가 전통적으로 에너지 효율, 열 제거 능력, 장비 보호를 중심으로 설계되어 왔으며, 수자원 관점에서의 최적화는 부차적인 요소로 취급되어 왔기 때문이다. 또한 냉각탑 배출 공기는 온도와 습도 변동성이 크고, 회수 시스템을 추가할 경우 냉각 성능 저하나 설비 복잡성 증가에 대한 우려가 존재한다.

해외 데이터센터 분야에서는 냉각 인프라와 수자원 관리의 결합을 시도한 사례가 일부 보고되고 있다. 예를 들어 Google의 데이터센터는 공조 시스템에서 발생하는 응축수를 냉각탑 보충수로 재이용하거나, 외기 조건에 따라 물 사용을 최소화하는 방식의 냉각 전략을 도입해 왔다. 그러나 이러한 접근 역시 데이터센터를 대상으로 한 사례가 대부분이며, 초고순도수와 극도의 공정 안정성이 요구되는 반도체 팹에 직접 적용하기에는 기술적·운영상의 제약이 크다.

그 결과 냉각 효율 개선, 수자원 손실 최소화, 폐열 활용 가능성을 동시에 고려하는 통합 설계 개념은 아직 초기 단계에 머물러 있다. 냉각 인프라는 여전히 ‘에너지 관리의 영역’으로, 수자원 회수 기술은 ‘수처리의 영역’으로 분리되어 논의되는 경향이 강하며, 두 인프라의 경계 지점에 대한 체계적인 분석은 부족한 상황이다. 이러한 분리는 클러스터 전체 차원에서 물과 에너지를 함께 최적화하는 접근을 어렵게 만드는 구조적 요인으로 작용한다.

향후 반도체 클러스터 연구에서는 냉각 인프라를 단순한 보조 설비가 아닌, 수자원 관리 전략의 핵심 요소로 재정의할 필요가 있다. 특히 냉각탑, 공조 시스템, 데이터센터 냉각 설비에서 발생하는 증발 손실과 폐열을 동시에 고려한 물-에너지 연계 분석을 통해, 냉각 성능을 저해하지 않으면서도 수자원 손실을 완화할 수 있는 설계 가능성을 검토하는 연구가 요구된다. 이는 기존의 공정 중심 수자원 관리 논의를 넘어, 반도체 클러스터를 하나의 통합 인프라 시스템으로 이해하기 위한 중요한 확장 영역에 해당한다.

III. 결론

i. 탐사의 핵심 내용 요약

본 해외 탐사는 미국 반도체 클러스터를 개별 팹이나 공정 단위가 아닌, 도시·에너지·수자원 인프라와 결합된 통합 시스템으로 이해하는 데 초점을 두었다. 애리조나 피닉스와 쉐들러 지역 사례는, 고온·건조한 환경이라는 불리한 조건 속에서도 반도체 산업이 안정적으로 운영될 수 있었던 배경이 공정 기술 자체가 아니라, 이를 지탱하는 도시 차원의 수자원·전력 인프라와 장기적 운영 전략에 있음을 명확히 보여준다.

탐사를 통해 확인된 핵심 시사점은 다음과 같다.

첫째, 반도체 수자원 재이용 문제는 고도 처리 기술의 성능 경쟁이 아니라, 장기 운전 안정성과 유지관리 가능성을 중심으로 한 인프라 설계 문제라는 점이다. 초순수(UPW) 재이용 과정에서 발생하는 biofouling, 막 수명 저하, 에너지 소비 증가는 개별 공정의 문제가 아니라, 실제 운전 환경에서 상호작용하며 누적되는 시스템 리스크로 작용한다. 이는 수자원 정책이 단기 재이용률 확대나 기술 도입 여부에만 집중할 경우, 오히려 공정 안정성과 에너지 부담을 동시에 확대할 수 있음을 시사한다.

둘째, 전처리 공정의 전략적 중요성과 에너지-수자원 연계 관점의 필요성이 확인되었다. 기존 반도체 수처리 논의가 후단 고도 정수 공정에 집중되어 왔다면, 미국 사례는 전처리 단계의 수질 안정성과 공정 균질성이 후단 공정의 에너지 소비와 운영 안정성을 구조적으로 좌우함을 보여준다. 특히 장기 운전과 파일럿 규모 실증을 기반으로 한 연구들은, 수처리 공정을 단순한 정화 설비가 아닌 에너지·자원 순환 인프라로 재해석해야 할 필요성을 제기한다.

셋째, 반도체 폐수 재활용의 한계는 특정 기술의 성능 부족이 아니라, 공정 간 연계 구조와 장기 운전 조건에서 형성되는 구조적 제약에 있다는 점이 분명해졌다. 난분해성 유기물, 옹스트롬 단위 미량 불순물, CMP 폐수 내 나노 입자 등은 기존 UF-RO-결정화(ZLD) 공정 체계에서 단기 제거율은 관리 가능해 보일 수 있으나, 장기 운전 시 에너지 부담과 공정 리스크를 증폭시키는 요인으로 작용한다. 이는 향후 수자원 정책이 처리 용량이나 제거율 중심에서 벗어나, 장기 분리

안정성과 공정 신뢰성을 핵심 기준으로 재설계되어야 함을 의미한다.

넷째, PFAS 사례는 반도체 수자원 재이용 정책의 한계 오염물질 개념을 명확히 드러낸다. PFAS는 제거 난이도, 분석 한계, 2차 폐기물 문제, 에너지 소비를 동시에 수반하며, 어떤 오염물질을 정책 설계의 기준점으로 설정하느냐에 따라 전체 시스템의 기술적·에너지적 한계가 구조적으로 규정됨을 보여준다. 이는 수자원 재이용 정책이 단순한 회수율 목표 설정에 머물 경우, 장기적으로 공정 리스크와 운영 부담을 확대할 수 있음을 시사한다.

마지막으로, 탐사는 수자원 관리의 범위를 액상 폐수 처리에 국한하지 않고, 냉각 및 공정 과정에서 발생하는 수증기 형태의 비가시적 수자원 손실까지 포함해야 할 필요성을 제기한다. AWH(Atmospheric Water Harvesting) 연구는 독립적인 수자원 공급 기술이라기보다, 기존 수자원 관리 체계에서 포착되지 않던 손실 경로를 보완적으로 이해하기 위한 접근으로서 의미를 가진다. 이는 반도체 클러스터를 하나의 통합 수자원 - 에너지 시스템으로 재정의하는 데 있어, 정책 설계의 범위를 확장할 필요성을 제시한다.

종합적으로 본 탐사는, 미국 반도체 클러스터의 사례를 통해 반도체 산업의 지속 가능성이 공정 기술 자체가 아니라, 수자원과 에너지 인프라의 설계 철학과 운영 구조에 의해 결정됨을 확인하였다. 이러한 인식은 향후 한국 반도체 클러스터가 재이용률 중심의 단편적 목표 설정을 넘어, 장기 운전 안정성, 에너지와 수자원의 연계, 오염물질 관리 기준, 도시 인프라와의 통합을 포함하는 지속 가능 운영 전략으로 전환해야 함을 시사한다.

ii. 탐사의 의의

본 연구는 미국 반도체 클러스터를 대상으로 한 해외 탐사와 전문가 인터뷰를 통해, 반도체 산업의 에너지 및 수자원 문제를 개별 공정이나 단일 기술의 효율 개선 차원이 아닌, 클러스터 단위 인프라 설계와 운영 전략의 문제로 재정의하고자 하였다. 기존 반도체 관련 연구와 정책 논의가 공정 효율, 처리 기술 성능, 재

이용률과 같은 단일 지표 중심으로 이루어져 왔다면, 본 연구는 전력·수자원·수처리·냉각 인프라가 상호 연결된 복합 시스템이라는 관점에서 접근했다는 점에서 차별성을 가진다.

특히 Intel Chandler Campus를 비롯한 미국 반도체 클러스터 사례를 통해, 반도체 산업에서 에너지와 물은 단순한 비용 요소가 아니라 공정 안정성과 무중단 운영을 지탱하는 핵심 기반시설임을 재확인하였다. 이는 반도체 산업의 지속가능성을 단기적인 자원 절감이나 규제 대응 차원이 아닌, 장기적인 인프라 설계와 리스크 관리의 문제로 확장해 이해해야 함을 시사한다.

수자원 측면에서는, 고도 수처리 기술의 성능 자체보다 장기 운전 안정성, 실제 공정 조건에서의 신뢰성, 클러스터 규모 적용 가능성이 재이용 시스템의 성패를 좌우한다는 점이 다양한 인터뷰를 통해 반복적으로 강조되었다. 특히 PFAS와 같은 미량 오염물질은 단순한 제거 대상이 아니라, 에너지 소비, 분석 인프라, 2차 폐기물 관리까지 연쇄적으로 영향을 미치는 구조적 제약 요인임을 확인함으로써, 수자원 재이용 정책이 기술 성능 중심 프레임에서 리스크 관리 중심의 정책 프레임으로 전환되어야 함을 도출하였다.

또한 본 연구는 기존 수자원 재이용 논의에서 상대적으로 간과되어 온 비공정 수자원(non-process water), 냉각 과정에서의 증발 손실, 폐열 활용 가능성 등을 함께 검토함으로써, 반도체 클러스터를 하나의 통합 물-에너지 시스템으로 이해할 필요성을 제기하였다. 이는 반도체 산업의 지속가능성 논의가 공정 내부를 넘어, 클러스터와 지역 인프라 차원으로 확장되어야 함을 보여주는 중요한 시사점이다.

종합하면, 본 연구의 의의는 미국 반도체 클러스터 사례를 단순히 비교하고 소개하는 데 그치지 않고, 이를 통해 한국 반도체 산업이 직면한 에너지·수자원 리스크를 구조적으로 재해석하고, 클러스터 단위의 지속가능 운영 전략을 모색할 수 있는 개념적, 정책적 토대를 마련했다는 점에 있다.

iii. 후속 연구 방향

본 연구는 미국 반도체 클러스터 사례를 통해 에너지 및 수자원 효율화 전략의 구조적 방향성을 확인하였으나, 이러한 사례를 한국 반도체 산업에 직접 적용하기

에는 산업 환경, 기후 조건, 인프라 구조, 정책 체계 측면에서 추가적인 검토가 요구된다. 따라서 향후 연구는 미국 사례의 단순 비교나 모방을 넘어, 한국 반도체 클러스터에의 적용 가능성을 검증하고 조정하는 단계로 확장될 필요가 있다.

첫째, 한국 반도체 클러스터의 기후·입지 조건을 반영한 물-에너지 수지 분석이 필요하다. 미국 애리조나와 같이 고온·건조한 지역을 전제로 설계된 냉각 및 수자원 운영 전략은, 사계절 변동성과 고온다습한 여름, 한파와 집중호우가 반복되는 한국의 기후 조건과 직접적으로 대응되지 않는다. 따라서 향후 연구에서는 한국 반도체 클러스터를 대상으로 냉각 부하 변동, 증발 손실 규모, 응축수 발생량, 계절별 에너지 소비 특성을 반영한 정량적 물-에너지 수지 분석이 선행되어야 한다.

둘째, 한국 반도체 공정 특성을 반영한 PFAS 발생 및 관리 전략의 재정의가 요구된다. 미국 사례를 통해 PFAS가 공정수 재이용의 전략적 한계 오염물질로 작용함을 확인하였으나, 국내 반도체 공정에서 PFAS의 사용 양상, 발생 공정, 배출 특성은 기업 및 공정별로 상이할 가능성이 크다. 이에 따라 한국 반도체 공정을 대상으로 한 PFAS 발생원 분석, 전구체 거동, 재이용 시스템 내 축적 가능성에 대한 기초 데이터 확보가 필요하며, 이를 기반으로 사후 처리 중심이 아닌 공정 단계별 관리 가능성을 검토하는 연구가 요구된다.

셋째, 한국 반도체 클러스터의 전력 인프라 구조를 반영한 에너지 연계 전략 검증이 필요하다. 미국 반도체 클러스터는 상대적으로 독립적 전력망 구성과 대규모 기저부하 전원 확보가 가능하지만, 한국은 국가 전력망 의존도가 높고, 전력 수급 및 송전 제약이 상대적으로 크다. 따라서 폐열 활용, AWH 연계, 에너지 회수형 수처리 공정과 같은 전략이 실제로 한국 전력 인프라 환경에서 어떤 효과를 가질 수 있는지에 대한 현실적인 검증이 필요하다.

넷째, 국내 규제·정책 체계와 연계된 수자원 재이용 기준의 재검토가 요구된다. 미국 사례에서는 파일럿 실증과 운영 데이터 축적을 통해 점진적으로 재이용

기준을 조정하는 접근이 가능했으나, 한국의 수자원 및 환경 규제는 상대적으로 사전 기준 중심으로 운영되는 경향이 강하다. 따라서 향후 연구에서는 국내 제도 환경을 고려하여, 공정 위치별 차등 수질 기준, 위험 기반 허용 기준, 단계적 실증 도입이 가능한 정책 설계 방향을 함께 검토할 필요가 있다.

다섯째, AI 기반 운영 지원 기술의 국내 적용 가능성 검증이 필요하다. 미국 사례에서 확인된 AI 및 디지털 트윈 기반 운영 개념은 데이터 축적과 인프라 여건이 전제된 접근이다. 한국 반도체 클러스터에 이를 적용하기 위해서는 실제 확보 가능한 데이터 수준, 센서 구축 비용, 운영 인력의 역할 분담 등을 고려한 단계적 도입 시나리오 연구가 요구된다. 이는 기술 도입의 실효성을 확보하기 위한 필수적인 검증 단계에 해당한다.

종합하면, 향후 연구는 미국 반도체 클러스터 사례에서 확인된 에너지·수자원 효율화 전략을 한국 산업 환경에 맞게 재해석하고 조정하는 적용 연구(translation research) 단계로 확장되어야 한다. 이러한 후속 연구는 한국 반도체 산업이 단기적인 효율 개선을 넘어, 장기적인 클러스터 지속가능성을 확보하는 전략으로 나아가기 위한 핵심 기반을 제공할 것이다.

IV. 참고 문헌

기사 및 온라인 자료

(1) Amin Mojiri. “Designing Hydrogel Sorbents for Efficient Atmospheric Water Capture: A Purpose-Oriented Approach” , 2025.11.23,

<https://www.iawha.org/post/designing-hydrogel-sorbents-for-efficient-atmospheric-water-capture-a-purpose-oriented-approach>

(2) SK hynix Newsroom. “SK하이닉스, 물 관리에 진심을 담아” , 2021.03.22. [세계 물의 날 특집] <https://news.skhynix.co.kr/keep-the-truth/>

(3) SK hynix Newsroom. “SK하이닉스가 ‘반도체 산업의 쌀’ 물을 관리하는 방법” , 2020.06.11. <https://news.skhynix.co.kr/how-to-manage-water/>

(4) 삼성전자 반도체 뉴스룸. “지속 가능한 내일을 위한 약속, 삼성전자

반도체와 물 이야기” , 2025.03.21,

<https://news.samsungsemiconductor.com/kr/%ec%a7%80%ec%86%8d-%ea%b0%80%eb%8a%a5%ed%95%9c-%eb%82%b4%ec%9d%bc%ec%9d%84-%ec%9c%84%ed%95%9c-%ec%95%bd%ec%86%8d-%ec%82%bc%ec%84%b1%ec%a0%84%ec%9e%90-%eb%b0%98%eb%8f%84%ec%b2%b4%ec%99%80-%eb%ac%bc/>

(5) 삼성전자 반도체 뉴스룸. “삼성전자 반도체의 수자원 순환 노력, 사람과 자연의 연대를 완성하다” , 2024.03.21.

<https://news.samsungsemiconductor.com/kr/%ec%82%bc%ec%84%b1%ec%a0%84%ec%9e%90-%eb%b0%98%eb%8f%84%ec%b2%b4%ec%9d%98-%ec%88%98%ec%9e%90%ec%9b%90-%ec%88%9c%ed%99%98-%eb%85%b8%eb%a0%a5-%ec%82%ac%eb%9e%8c%ea%b3%bc-%ec%9e%90%ec%97%b0%ec%9d%98/>

(6) 한국마이크로전자 및 패키징 학회 (2021.08.24), “용인시, ‘용인 반도체클러스터 관리기본계획’ 수립, 고시” ,
<https://www.etnews.com/20210824000092>

학술 논문 및 자료

(1) 김원영, 권지현, 나수현 외 4 (2025), 《수령 깊은 혁신: 용인 반도체 클러스터의 편익, 위협, 그리고 대안》, 재단법인 숲과나눔.

(2) 우윤철 (2022), 《공업용수 확보를 위한 반도체 폐수처리 재이용 기술개발》(TRKO202300003719), 한국건설기술연구원 · 환경부.

(3) 이중훈 · 심재후 · 노호정 · 박광덕 · 유윤철 (2022), <반도체 폐수를 이용한 물 재이용 공정에서의 특정오염물질 제거 및 거동 평가>, <대한환경공학회 2022년도 국내학술대회 학술발표논문집>, 151.

(4) 지은상 · 김재우 · 신대윤 (1999), <반도체 산업폐수 재이용 기술에 관한 연구>, <환경위생공학회지>, 14(4), 137-142.

(5) Lee, Sangsuk, et al. “Influence of pore size distribution on ultrafiltration membranes separation performance.” Separation and Purification Technology (2025): 136207.

(6) Golwala, Harmita, et al. “Solid waste: An overlooked source of microplastics to the environment.” Science of the Total Environment 769 (2021): 144581.

(7) Mojiri, Amin, et al. "Comprehensive review of polycyclic aromatic hydrocarbons in water sources, their effects and treatments." Science of the total environment 696 (2019): 133971.

(8) Mojiri, Mohsen, and Alireza R. Bakhshai. "An adaptive notch filter for frequency estimation of a periodic signal." IEEE Transactions on Automatic Control 49.2 (2004): 314-318.

(9) Navidpour, Amir Hossein, et al. "Investigation of advanced oxidation process in the presence of TiO₂ semiconductor as photocatalyst: property, principle, kinetic analysis, and photocatalytic activity." Catalysts 13.2 (2023): 232.

(10) Mojiri, A., Ziyang, L., Tajuddin, R. M., Farraji, H., & Alifar, N. (2016). Co-treatment of landfill leachate and municipal wastewater using the ZELIAC/zeolite constructed wetland system. Journal of Environmental Management, 166, 124-130.

(11) Mojiri, A., Zhou, J. L., Ratnaweera, H., Ohashi, A., Ozaki, N., Kindaichi, T., & Asakura, H. (2021). Treatment of landfill leachate with different techniques: An overview. Water Reuse, 11(1), 66-96.

정부 보도자료 및 기관 보고서

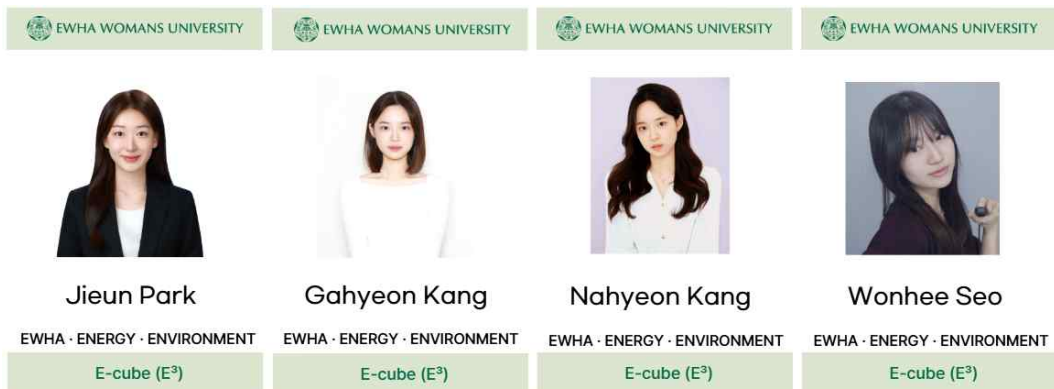
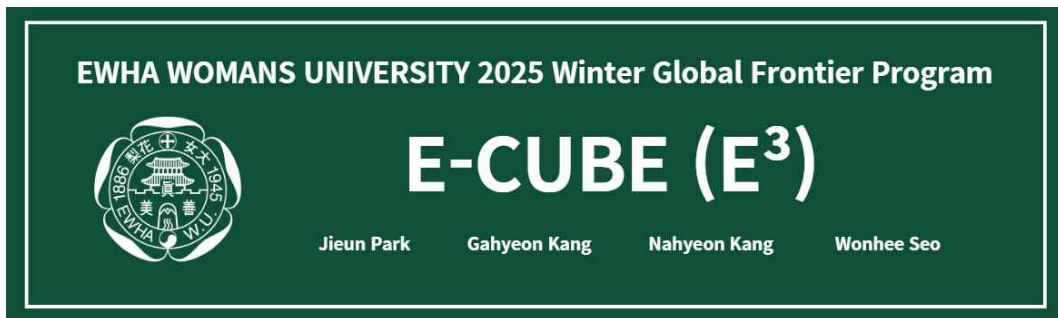
(1) 국회입법조사처(2025.08.21), "용인 반도체 클러스터 전력 공급 리스크 진단", 《이슈와 논점》 제2401호,
<https://www.nars.go.kr/report/view.do?cmsCode=CM0018&brdSeq=48017>

(2) 산업통상자원부·과학기술정보통신부(2024.01.15), "세계 최대·최고 반도체 메가 클러스터 조성방안 발표", 《국민과 함께하는 민생토론회 보도자료》, 산업통상자원부, 보도자료.

(3) 산업통상자원부(2024.02.27), "첨단 특화단지 전력 적기공급, 원팀으로 대응", 《보도자료》,
<https://eiec.kdi.re.kr/policy/callDownload.do?num=248496&filenum=1&dttime=20240228071420>

<부록>

i. E-Cube 현수막 및 명찰



ii. 컨택용 팀 소개 PPT




MEETING PROPOSAL

● EWHA GLOBAL FRONTIER PROJECT

Telephone
+82 010-3082-0154

email
ecubehw@gmail.com

Address
52, Daehajodong-gil, Seodamun-gu, Seoul,
Republic of Korea New Engineering Building

TABLE OF CONTENT

MEETING PROPOSAL

01 Introduction

02 Background

03 Meeting Topic

04 Team Overview




INTRODUCTION

E-Cube (E³)
E-cube combines the three keywords - Ewha, Energy, and Environment :representing E³ (E-cube), and stands for an Ewha student exploration team dedicated to energy efficiency and environmental issues.

Team Formation Background
The team recognized the excessive use of power and water in semiconductor processes. In particular, the need for conservation technologies and infrastructure in the Yongin Semiconductor Cluster in Korea was identified as a critical issue, leading to the formation of the team.




BACKGROUND

01 Excessive Resource Consumption
Semiconductor manufacturing consumes vast amounts of electricity and water. Nearly half of total power is used for cleanroom HVAC, while EUV lithography requires up to ten times more power. UPW production also demands enormous resources.

02 Limited Resource Management in Korea
Unlike the United States, Korea still relies heavily on UPW and lacks sufficient strategies for energy efficiency. These limitations highlight the urgency of securing both power and water resources.

03 Challenges for the Yongin Semiconductor Cluster
The Yongin Semiconductor Cluster in Korea will require over 10 GW of electricity by 2053. The adoption of EUV equipment further increases consumption, making power and water infrastructure a decisive factor for sustainable operation.



Yongin Semiconductor Cluster




MEETING TOPIC

Developing Sustainable Operation Strategies for the Yongin Semiconductor Cluster based on Energy and Water Efficiency Models from U.S. Semiconductor Clusters

Infrastructure - Level Exploration
Energy Storage Systems (ESS) Integrated with Renewable Energy
Analysis of Smart-Grid-Based Energy Efficiency Infrastructure

Process-Level Exploration
Investigation of Power-Saving Mechanisms in Advanced Processes, including High-Efficiency RF Power Delivery, Pulsed Plasma, and Atomic Layer Etching (ALE)

Factory-Level Exploration
Evaluation of Waste Heat and Gas Recovery System Efficiency
Analysis of HVAC Optimization and AI-Driven Energy Management Systems

Water Resource Efficiency Exploration
Analysis of Advanced UPW Production and Rinse Water Reuse Practices
Review of Urban Purple-Pipe Systems and Circular Water Management Models




TEAM OVERVIEW






Jieun Park (Team Leader)

- Majoring in Chemistry
- SK Hynix Semiconductor Process Training
- Semiconductor Process & Equipment Research
- National Startup Competition Award



Gaheon Kang

- Majoring in Mechanical & Biomedical Engineering
- Young Engineers Honor Society, Planning and Strategy Department
- 1st place in the TMS'20 Mechanical Engineering Competition
- San Francisco Overseas Training



Nahyeon Kang

- Majoring in Materials Science and Engineering
- SAMSUNG Electronic Semiconductor Training
- DISCO University Student Group Program
- Low-Carbon Plant Engineering Research



Wonhee Seo

- Majoring in Chemical Engineering
- Minoror in Climate & Energy Engineering
- BMW Korea Future Foundation YSDP Program
- Challenges Semester Program

EXPLORATION PLAN



Our team is scheduled to arrive at LAX on December 22 at 07:20 and depart on January 1 at 09:50. We plan to visit the Los Angeles area and San Francisco during the following periods

December 22-24 & December 29-31

- San Francisco - San Jose
- Los Angeles

We are also available on weekends and Christmas Day, although we understand these dates may not be ideal. If you could share any time slots that work for you, we would be more than happy to adjust our schedule accordingly.

THANK YOU

● WE WOULD BE GRATEFUL FOR THE OPPORTUNITY TO MEET AND DISCUSS

Telephone
+82 010-3082-0154

email
ecubehw@gmail.com

Address
52, Daehajodong-gil, Seodamun-gu, Seoul,
Republic of Korea New Engineering Building

iii. 인터뷰이와 촬영한 사진

<p>1) Intel 김종수 엔지니어</p> 	<p>2) Dr. Marisol Cira</p> 
<p>3) Dr. Golwala</p> 	<p>4) UCLA 이상석 박사님</p> 
<p>5) Dr. Binglin Guo</p> 	<p>6) ASU Amin Mojiri 박사님</p> 

iv. 현장 탐사 및 회의 사진

