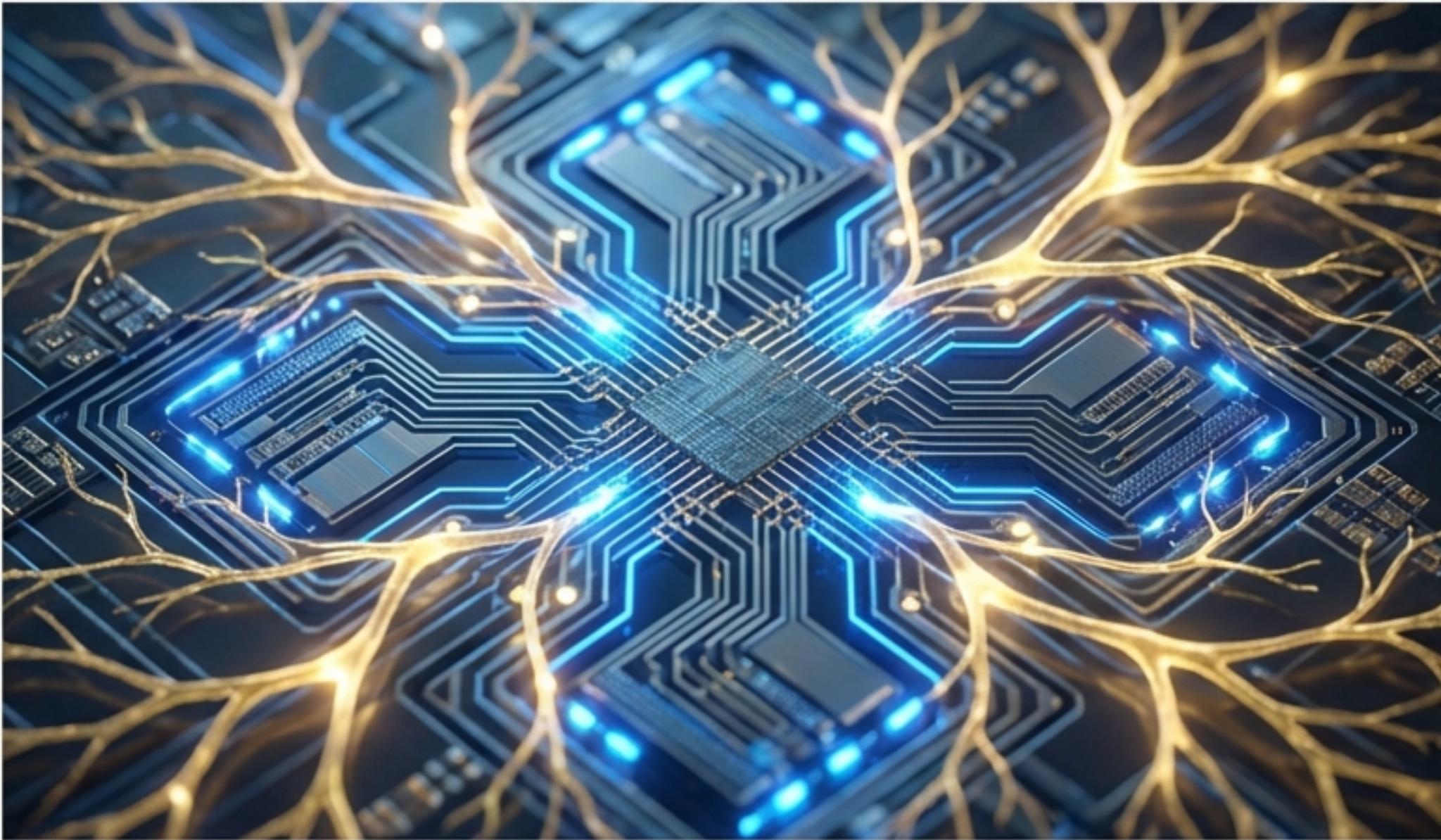


# AI의 미래: 뇌를 모방하는 것을 넘어

기존 컴퓨팅의 한계에서 벗어나, 행동을 통해 의미를 창조하는 '내부-외부(Inside-Out)' 패러다임에 기반한 뉴로모픽 컴퓨팅의 혁명



본 자료는 인공지능, 신경과학, 컴퓨터 아키텍처 분야의 연구자, 엔지니어, 전략가를 대상으로  
뉴로모픽 패러다임에 대한 심층적이고 통합적인 통찰을 제공하기 위해 제작되었습니다.

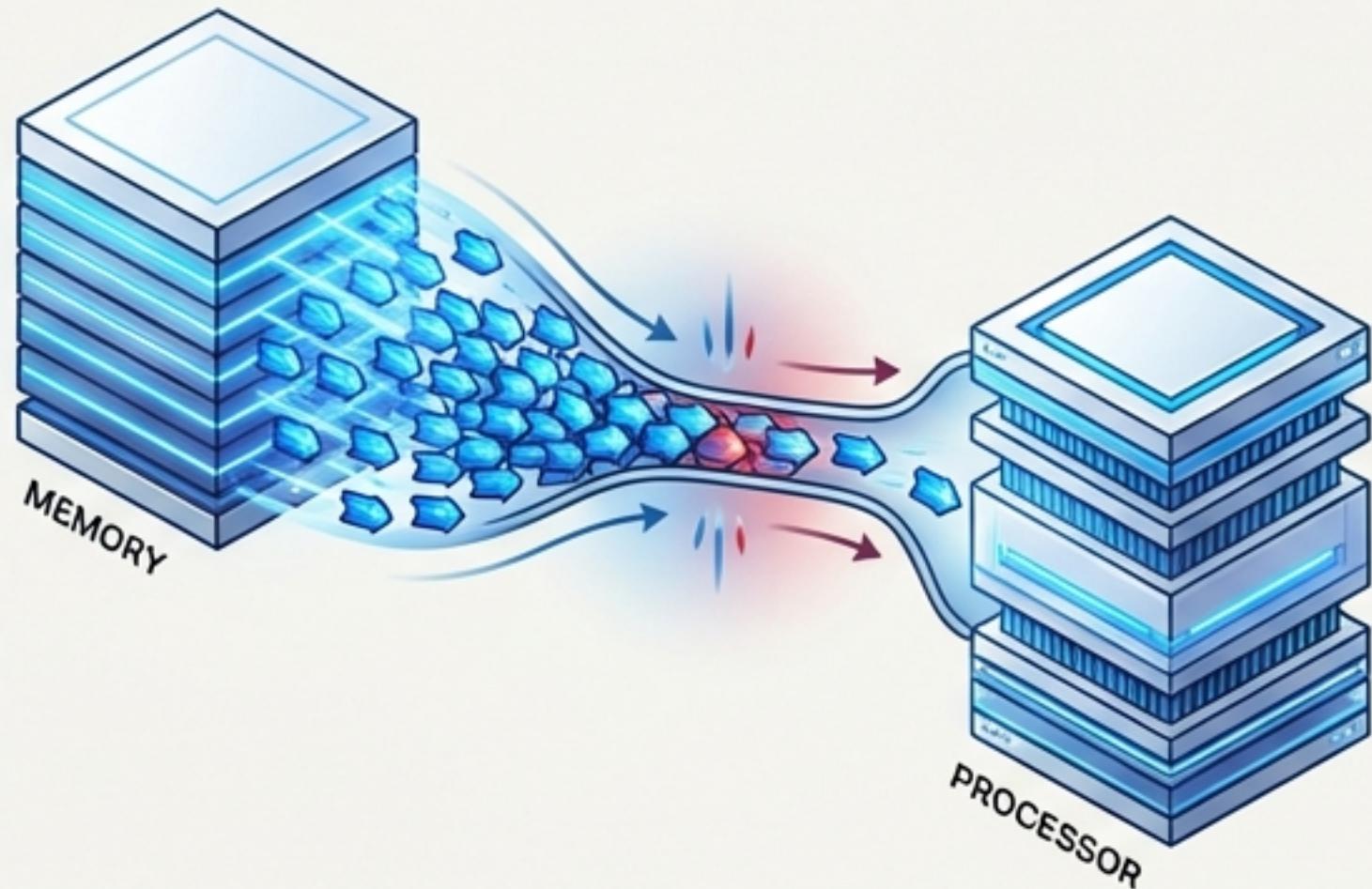
# 실리콘의 시대가 끝나가고 있습니다

반세기 동안 기술 발전을 이끌어온 무어의 법칙은 이제 물리적 한계에 도달했습니다.

우리는 AI의 다음 시대를 열 새로운 하드웨어가 필요합니다.

## 문제점 1: 폰 노이만 병목 현상 (The Von Neumann Bottleneck)

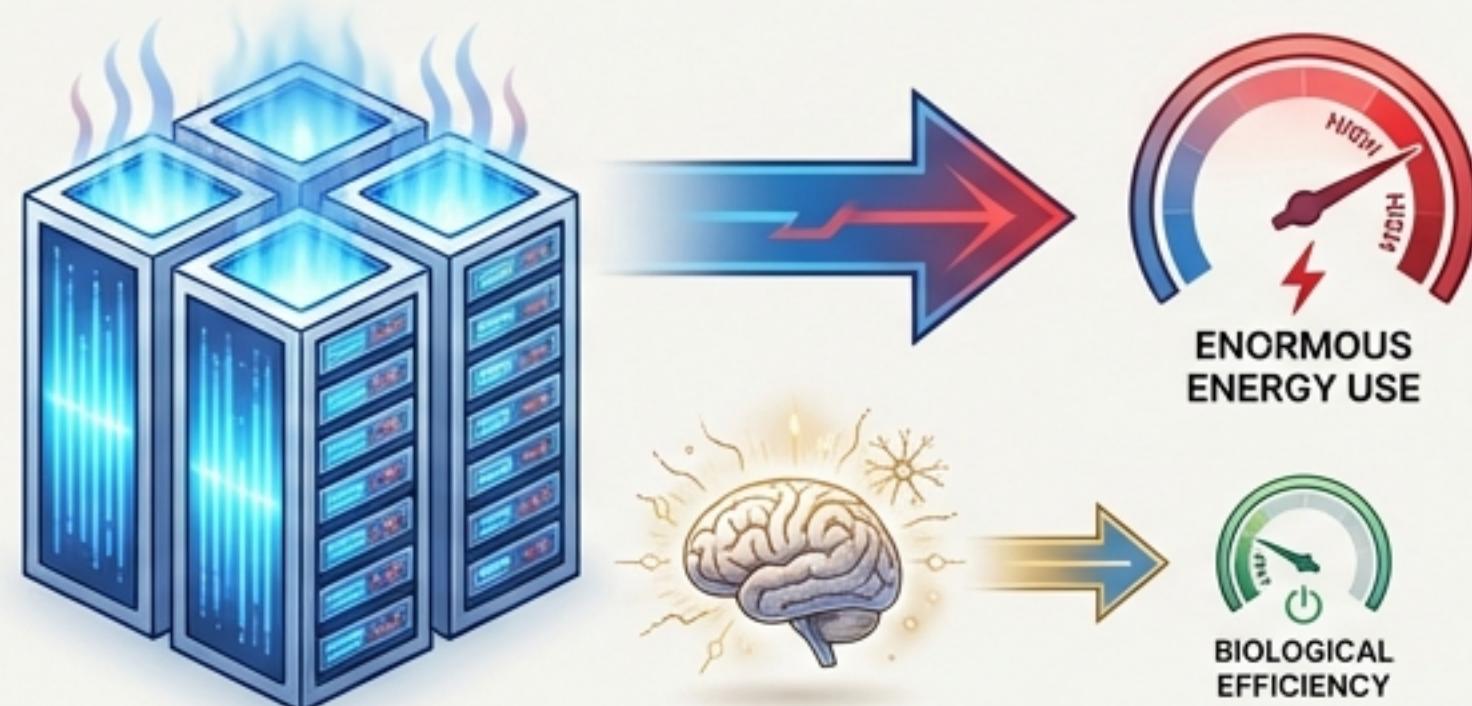
메모리와 프로세싱 유닛의 분리로 인해 발생하는 데이터 트래픽 정체 현상을 설명합니다.



## 문제점 2: 지속 불가능한 에너지 소비 (Unsustainable Energy Consumption)

기존 컴퓨팅 시스템, 특히 머신러닝과 같은 작업은 막대한 양의 에너지를 소비합니다.

이는 AI 기술의 확장에 있어 심각한 제약 요소입니다.



“우리는 실리콘의 근본적인 물리적 한계에 부딪히고 있습니다.  
더 나아가기 위해 필요한 에너지는 지속 불가능해지고 있습니다.”

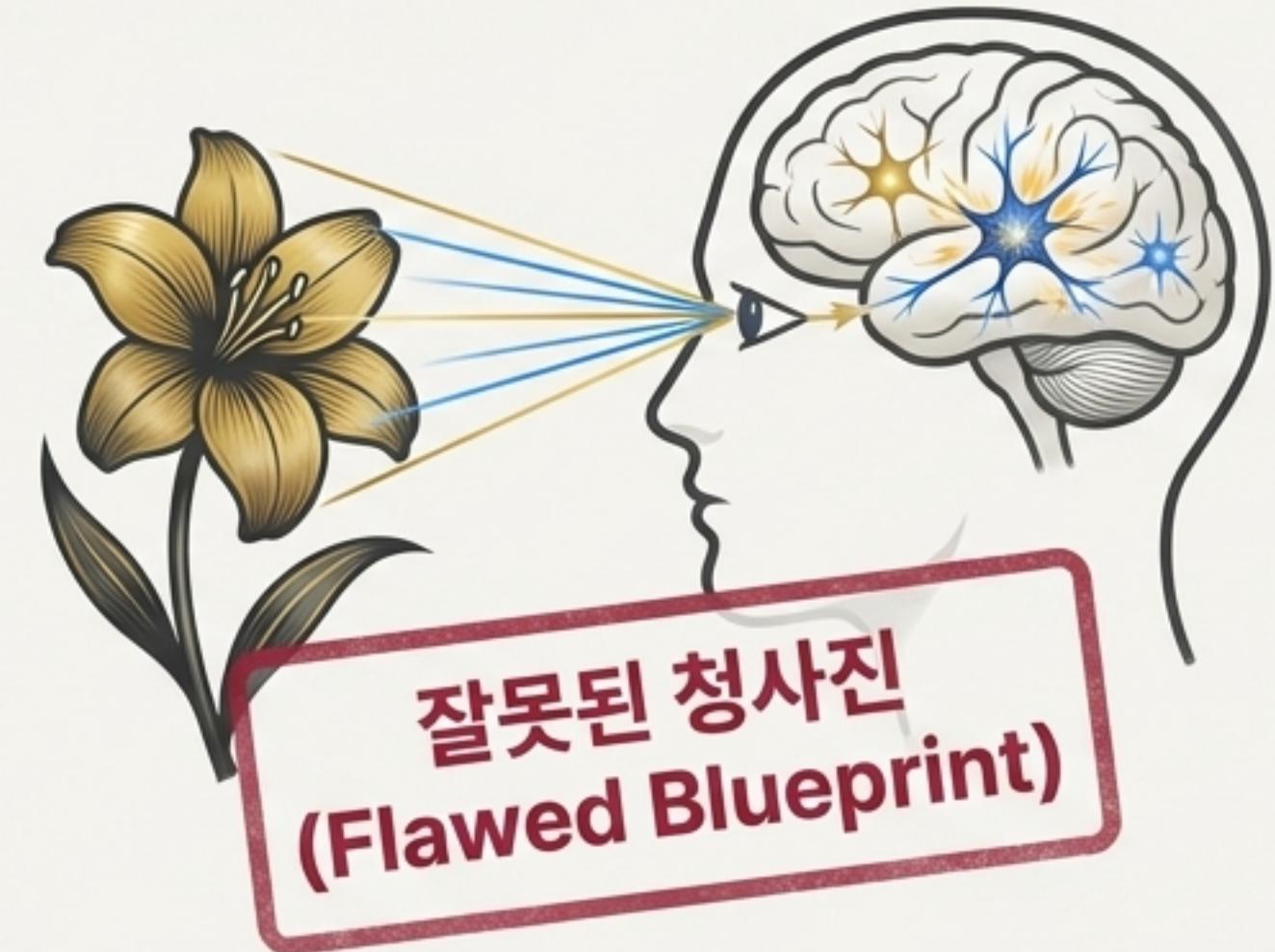
현재의 아키텍처는 지능형 시스템의 미래를 담아내기에 너무 좁고 비효율적입니다.

# 우리는 뇌라는 설계도를 잘못 읽고 있었습니다

핵심 개념:

‘외부-내부(Outside-In)’  
프레임워크

전통적인 신경과학과 인지 심리학은 뇌를 외부 세계의 정보를 수동적으로 받아들여 처리하고 ‘표상(representation)’하는 장치로 간주해왔습니다. 이 관점에서 ‘인식’은 외부 자극에서 시작되어 뇌 내부로 전달되는 일방적인 과정입니다.

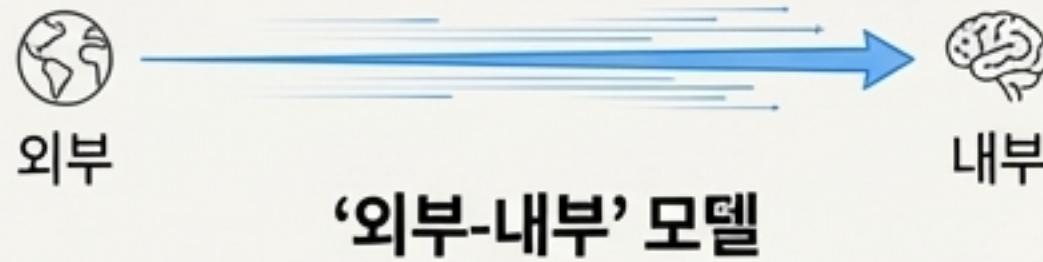


이 모델의 문제점:

1. 의미의 부재: 뇌 내부의 신경 활동은 그 자체로 의미를 갖지 못합니다. 외부 자극과 신경 반응 사이의 상관관계는 실험자에게만 의미가 있을 뿐, 뇌 자체는 그 의미를 알 수 없습니다. 이를 ‘심볼 그라운딩 문제(symbol grounding problem)’라고 합니다.
2. 수동성의 오류: 뇌는 단순히 외부 자극을 기다리는 수동적 수신기가 아닙니다. 이 모델은 뇌의 능동적이고 예측적인 측면을 설명하지 못합니다.

만약 뇌가 세상을 수동적으로 표상하는 것이 아니라면,  
뇌는 대체 무엇을 하는 것일까요?

# 패러다임의 전환: 뇌는 '내부'에서 시작됩니다



핵심 이론: György Buzsáki의  
‘내부-외부(Inside-Out)’ 프레임워크

뇌의 주된 임무는 세계를 표상하는 것이 아니라,  
생존하고 번식하기 위해 신체를 제어하는 것입니다.  
뇌는 끊임없이 가설을 세우고, 행동을 통해 그 가설을  
검증하며, 그 과정에서 감각 정보에 ‘의미’를 부여합니다.



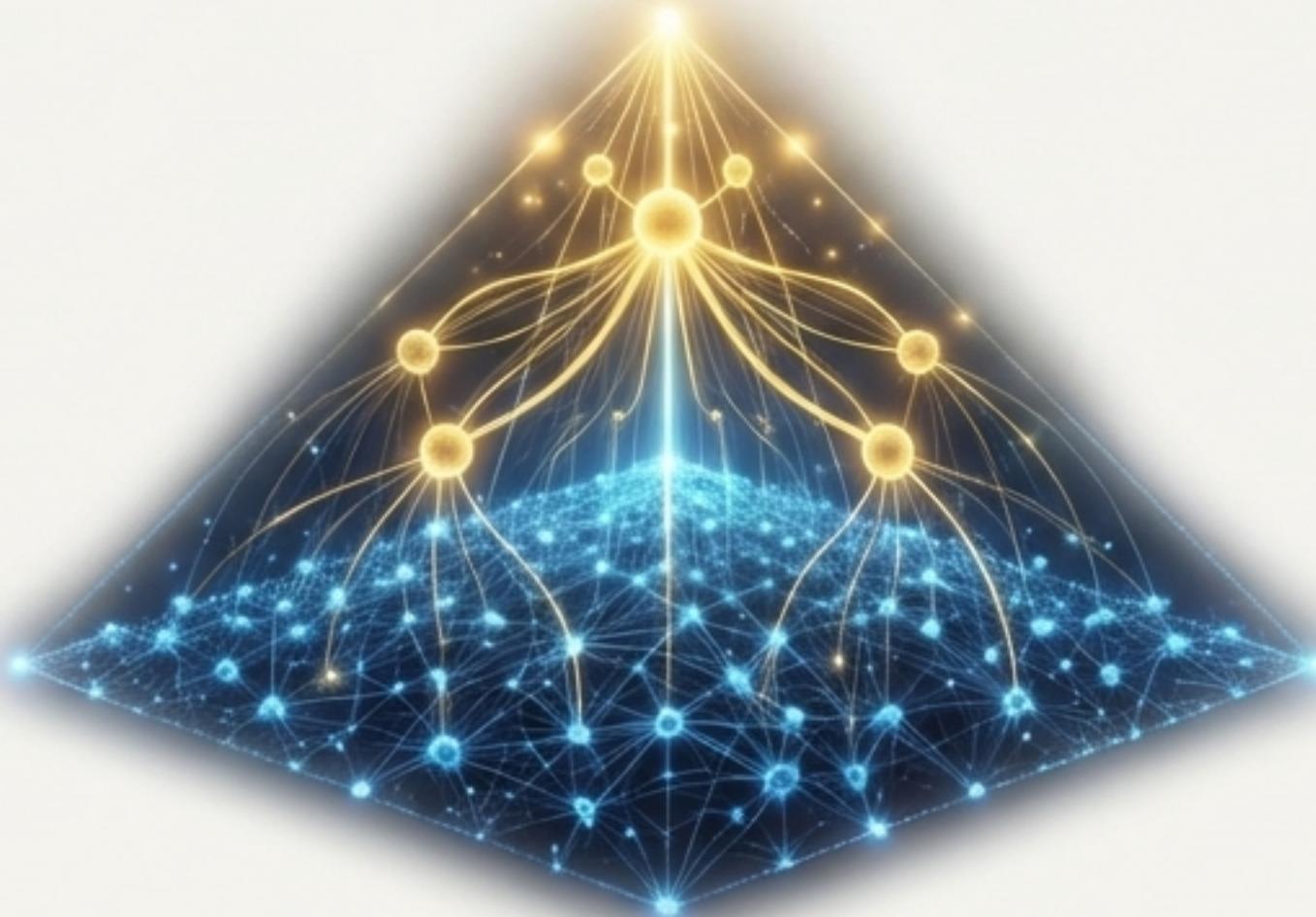
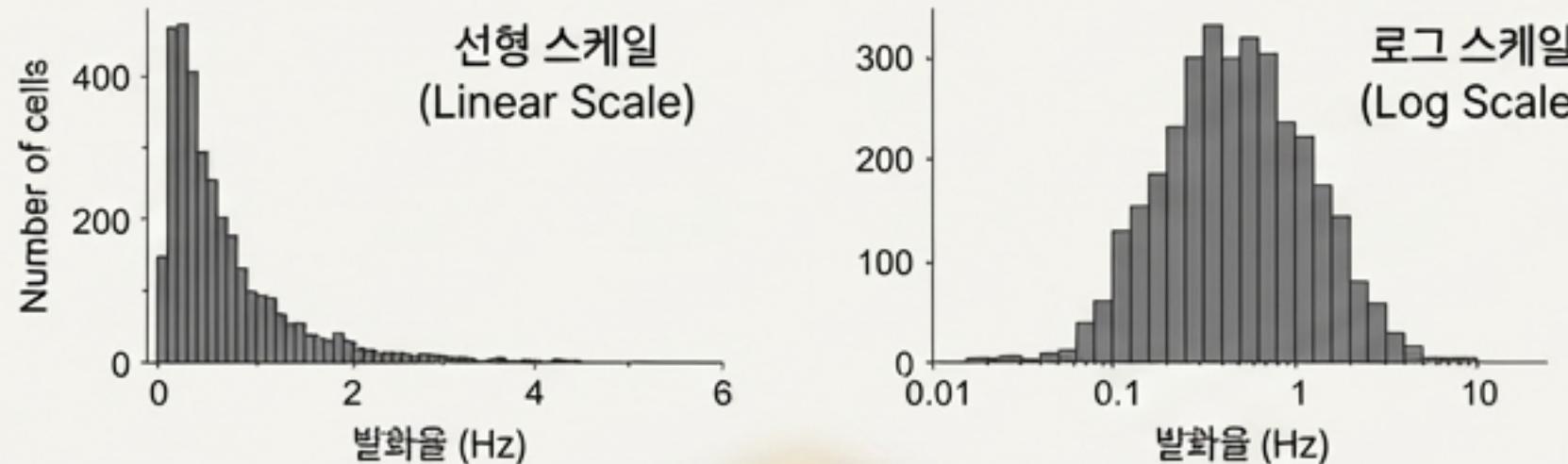
핵심 메커니즘:  
행동을 통한 의미 부여  
(Meaning through Action)

감각 정보는 행동이라는 ‘제2의 의견(second opinion)’을 통해 검증될 때 비로소 의미를 갖게 됩니다. 뇌는 자신의 행동이 감각 입력에 어떤 변화를 가져오는지 비교함으로써 외부 세계를 이해합니다. 이는 ‘예측 실행 신호(corollary discharge)’ 메커니즘을 통해 이루어집니다.

“뇌는 정보를 처리하는 것이 아니라, 정보를 창조합니다.”

# 효율성의 비밀: 비민주적이고 로그 스케일화된 뇌

뇌의 연결성과 활동은 정규 분포가 아닌, 극소수가 전체를 지배하는 **비대칭적(skewed)**, **로그-정규 분포(log-normal distribution)**을 따릅니다.



## 구조적 및 동적 특징

- 연결성**: 소수의 '허브' 뉴런이 다른 대부분의 뉴런보다 훨씬 더 많은 연결을 가집니다.
- 시냅스 강도**: 소수의 강력한 시냅스가 네트워크 역학을 주도합니다.
- 발화율**: 10-20%의 뉴런이 전체 스파이크의 절반을 생성합니다.

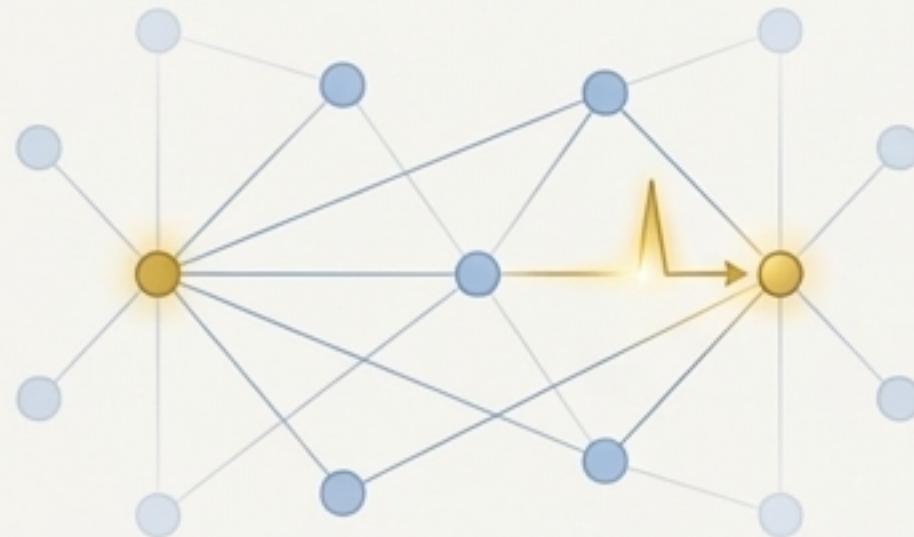
## 이것이 왜 중요한가?

- 효율성과 안정성**: 약한 입력은 증폭하고 강한 입력은 감쇠시켜, 넓은 동적 범위에 반응합니다.
- 견고성과 적응성**: 소수의 강력한 '경직된' 회로는 빠른 추측("Good-Enough Brain")을, 다수의 약한 '가소성 높은' 회로는 새로운 학습("Precision Brain")을 담당합니다.

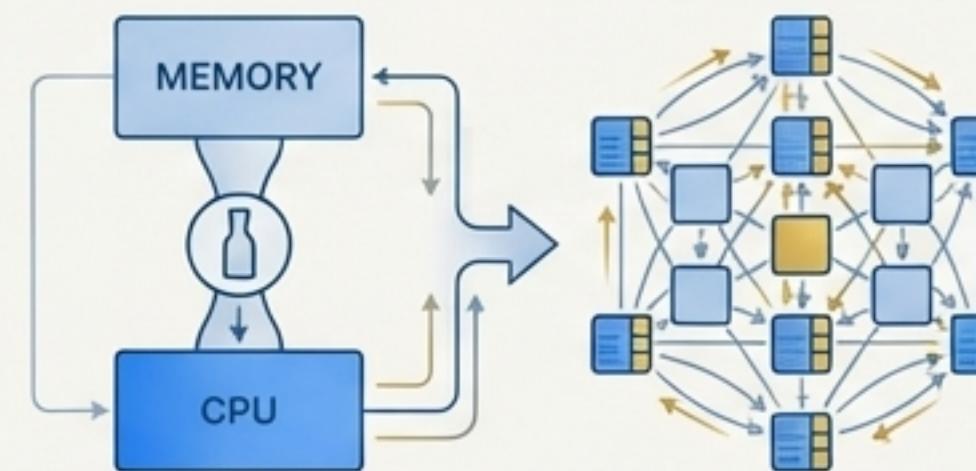
# 새로운 청사진으로 짓는 기술: 뉴로모픽 컴퓨팅

뉴로모픽 컴퓨팅은 생물학적 신경 시스템의 아키텍처와 기능을 모방하는 계산 패러다임입니다.  
이는 단순히 뇌의 구조를 복제하는 것이 아니라, 뇌의 작동 ‘원리’를 구현하는 것입니다.

## 이벤트 기반 처리 (Event-Driven Processing)



## 분산 아키텍처 및 병렬 처리 (Distributed Architecture & Parallel Processing)



뉴런처럼 정보(이벤트)가 발생했을 때만 계산을 수행하여 에너지를 절약합니다.

**연결 :** 의미 있는 ‘사건’에만 반응하여 행동을 생성하는 ‘내부-외부’ 뇌의 효율성을 반영합니다.

메모리와 처리 장치가 통합되어 있어 폰 노이만 병목 현상을 극복하고, 수많은 정보를 동시에 처리합니다.

**연결 :** 뇌의 비민주적이고 고도로 연결된 구조를 모방하여, 행동을 위한 빠르고 통합적인 계산을 가능하게 합니다.

## 초저전력 소모 (Ultra-Low Power Consumption)

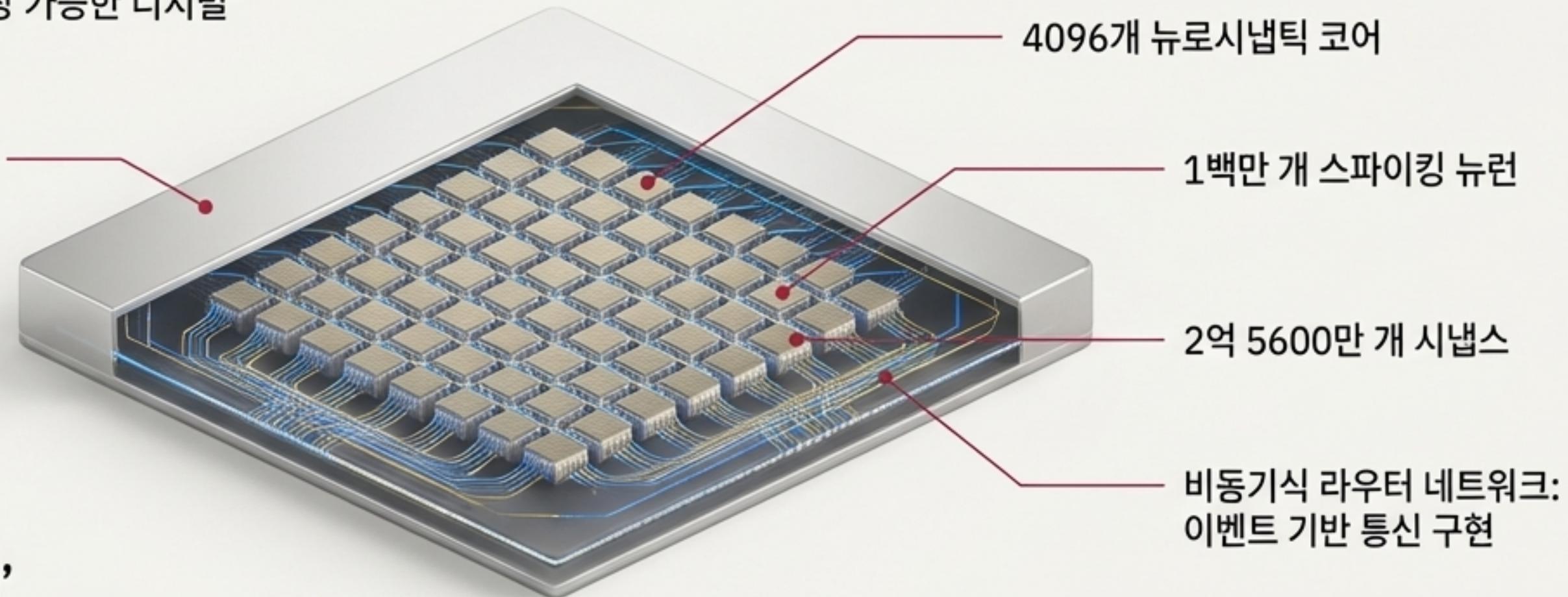


인간의 뇌는 슈퍼컴퓨터보다 훨씬 적은 에너지로 복잡한 작업을 수행합니다. 뉴로모픽 시스템은 이를 목표로 합니다.

**연결 :** 행동 중심의 시스템은 불필요한 계산을 최소화하여 에너지 효율을 극대화합니다.

# 원리의 구현: IBM TrueNorth 칩

DARPA SyNAPSE 프로그램의 일환으로 개발된 TrueNorth는  
폰 노이만 구조를 탈피한 최초의 확장 가능한 디지털  
뉴로모픽 아키텍처입니다.



‘성능을 통해 본 ‘내부-외부’ 원리’

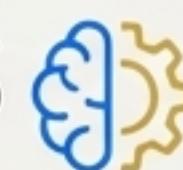
**65mW**



전력 소비

불필요한 계산과 데이터 이등을  
최소화하는 행동 지향적 시스템의  
에너지 효율성을 증명합니다.

**58 GSOPS**



초당 시냅스 연산

대규모 병렬 처리를 통해 실시간 인지  
작업이 가능함을 보여줍니다.

**100,000x**



에너지 효율 개선

기존 서버 프로세서 대비 아키텍처의  
근본적인 차이가 가져오는 결과입니다.

새로운 세대의 초저전력  
병렬 아키텍처를 대표합니다.

# 뉴로모픽 하드웨어의 최전선

2025년, 뉴로모픽 칩은 엣지 AI 및 분산 지능에 대한 수요 증가와 맞물려 본격적으로 시장에 진입하고 있습니다. 주요 플레이어들은 각기 다른 강점을 바탕으로 혁신을 이끌고 있습니다.

Feature	BrainChip Akida 2.0	Intel Loihi 2	IBM TrueNorth
도입 연도 (Year Introduced)	2024	2024	2014 (still active)
뉴런 수 (Neurons)	~1.2 million	~1 million	1 million
학습 방식 (Learning)	On-chip, STDP	On-chip, customizable	Offline (train-then-deploy)
전력 소비 (Power Consumption)	<10 mW	<50 mW	~70 mW
프로그래밍 (Programming)	PyTorch-to-SNN, Akida SDK	Lava, NxSDK	Corelets, Compass
주요 응용 분야 (Applications)	Edge AI, IoT, robotics	Neuroscience, robotics	Large-scale brain emulation

## Akida: 실시간, 초저전력 엣지 인텔리전스에 최적화

Akida: 실시간, 초저전력 엣지 인텔리전스에 실시간, 초저전력 엣지 인텔리전스에 최적화

## Loihi 2: 유연성과 신경과학적 정확성에 중점

Loihi 2: 유연한 유연성과 신경성과 신경과학적 정확성, 증폭, 유연성과 신경과학적 정확성에 중점을

## TrueNorth: 대규모 뇌 에뮬레이션을 위한 검증된 플랫폼

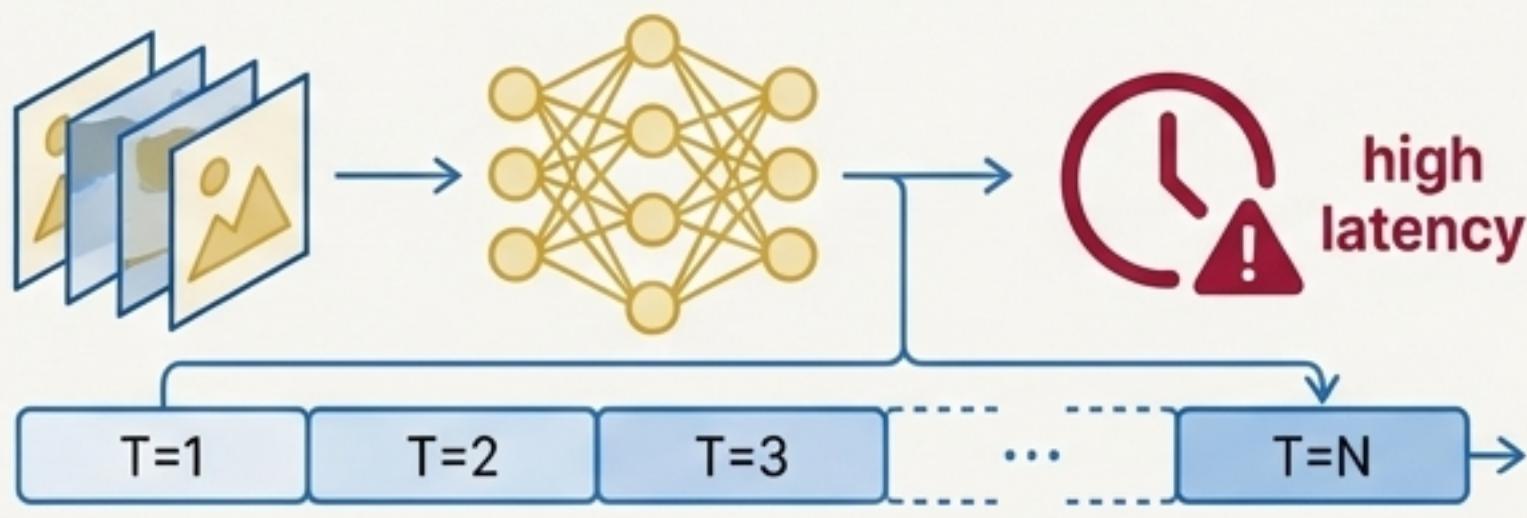
TrueNorth: 대규모 뇌 대규모 에뮬레이션을 위한 검증된 플랫폼

이 칩들은 인간의 인지를 모방하는 AI에 더 가까워지면서, 내일의 '실리콘 두뇌'를 구축하고 있습니다.

# 소프트웨어 혁명: 단일 타임스텝으로 SNN의 잠재력을 깨우다

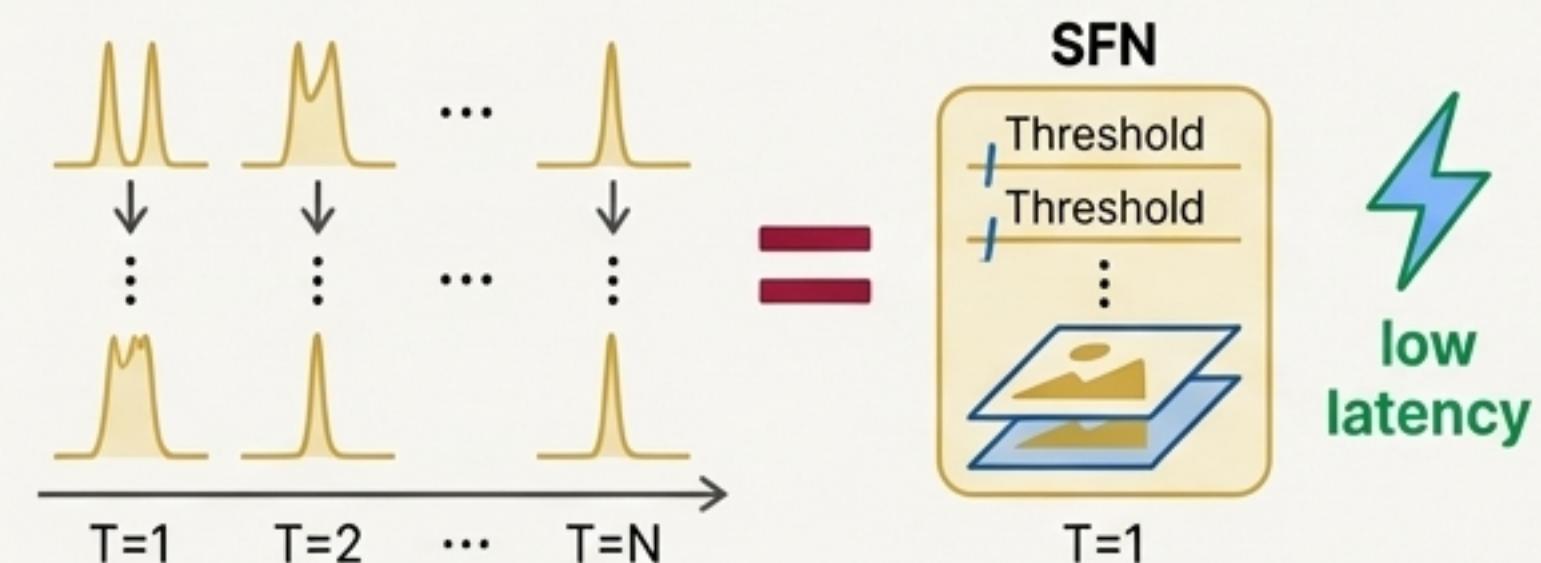
## 배경: 스파이킹 신경망 (SNNs)의 과제

기존 ANN-to-SNN 변환 기술은 높은 성능을 위해 긴 타임스텝이 필요했고, 이는 높은 추론 지연 시간과 계산 비용을 유발했습니다.



## 획기적 발전: 단일 타임스텝( $T=1$ ) 추론의 실현

'시간-공간 등가성 이론'을 통해 다중 타임스텝의 통합-발화 뉴런이 단일 타임스텝의 스케일-발화 뉴런(SFN)과 등가임을 증명했습니다.



## SFormer (SFN-based Spiking Transformer)

**88.8%**

이는 기존 SOTA 모델이  $T=2$ 에서  
달성한 84.0%를 뛰어넘는 성능입니다.

Top-1 정확도, ImageNet-1K ( $T=1$  조건)

## 시사점

SNN의 가장 큰 약점이었던 지연 시간 문제가 해결되면서,  
뉴로모픽 컴퓨팅의 실제 적용 가능성이 극적으로 향상되었습니다.

# 새로운 기술을 향한 세계적 경쟁: 중국의 국가 전략

중국은 AI 연구와 뇌 과학의 '융합(混合)' 필요성을 국가적으로 받아들였으며, 이는 독립적인 AI 분야의 가치를 인정하기 전부터 시작되었을 가능성이 있습니다.

국가 프로젝트:  
'중국 뇌 프로젝트(中国脑计划)'

2016년 3월, 제13차 5개년 계획의 일부로 승인된 15년 장기 프로젝트.

'뇌 모방 AI'를 다른 접근법보다 우선순위로 지정.

"뇌 인지 및 행동의 기저에 있는 신경 회로 메커니즘을 해부하고", "시뮬레이션된 뇌와 해당 AI 알고리즘 및 하드웨어를 개발하기 위한 기반을 구축"하는 것.

## 중국 국가 전략의 3대 축 (The Three Pillars)



뇌 모방 AI  
(Brain-inspired AI,  
类脑智能)

인간 인지의 측면을  
모델링하는 AI.

커넥토믹스  
(Connectomics)

뇌 지도(brain  
mapping) 연구.  
뇌 연결망을 분석.

뇌-컴퓨터  
인터페이스  
(Brain-Computer  
Interfaces, BCI)

두 플랫폼을 연결하는  
기술.

## 전략적 함의

중국은 뉴로모픽 컴퓨팅을 차세대 AI 기술 개발의 핵심으로 간주하고, 이를 통해 기술적 우위를 확보하고자 합니다.

# 중국의 뇌 연구 생태계: 인프라와 인재

중국의 AI-뇌 과학 프로젝트는 정부의 선언과 주요 연구 기관, 그리고 세계적 수준의 과학자들에 의해 추진되는 실체적인 국가적 사업입니다.

## 전국적인 연구 네트워크 (Nationwide Research Network)



## 주요 연구 기관 및 인물 (Key Institutions and Leaders)

### Xu Bo (徐波)

중국과학원(CAS) 자동화 연구소 소장,  
차세대 인공지능 전략 자문 위원회 의장.

### Shi Luping (施路平)

칭화대학교 뇌모방 컴퓨팅 연구 센터 소장,  
'천계(Tianjic)' 칩 개발자.

### Guo Aike (郭爱克)

상하이 신경과학 연구소(ION) 박사,  
학습 및 기억 연구실 책임자.

### He Yong (贺永)

베이징사범대학(BNU) 인지 신경과학 및 학습 국가중점실험실  
부소장, 뇌 영상 및 커넥토믹스 전문가.

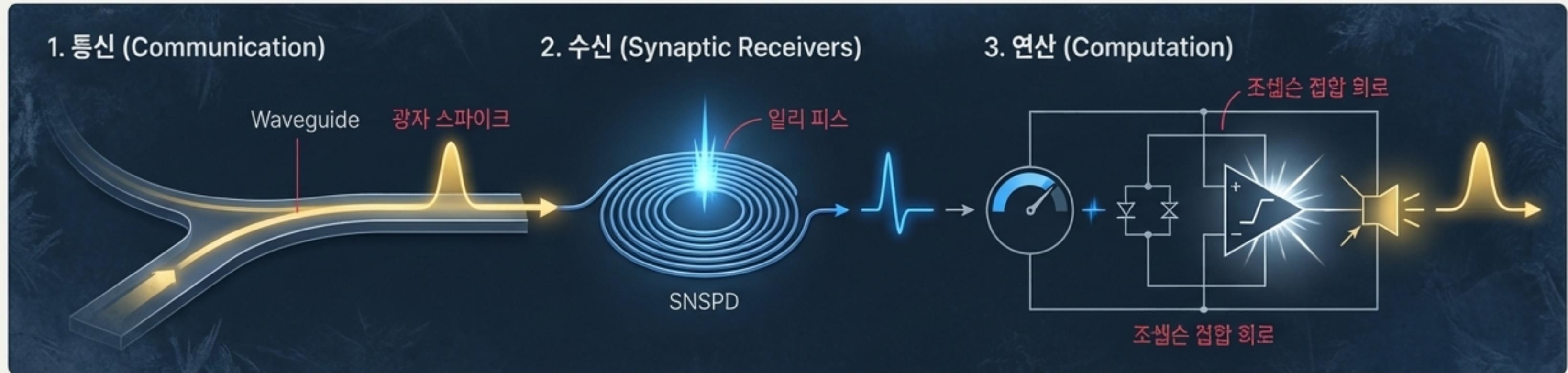
## 국제 협력 및 기술 이전

중국의 연구 기관들은 미국 인간 커넥톰 프로젝트, 유럽 인간 뇌 프로젝트에 참여한 전문가들로 구성된 자문위원회를 운영하는 등, 해외 기술과 인재를 적극적으로 활용하고 있습니다.

# 다음 지평선: 빛과 극저온의 만남

초전도 광전자 뉴로모픽 컴퓨팅: 포토닉스의 초고속 통신 능력과 초전도체의 초고효율 연산 능력을 결합한 혁신적인 플랫폼입니다.

## 작동 메커니즘 (Working Mechanism)



## 압도적인 성능 (Overwhelming Performance)

에너지 효율 (Energy Efficiency)

**20 아토줄 (attojoules)**

시냅스 이벤트 당 에너지 소모

CMOS 기반 뉴로모픽 칩보다  $10^6$ 배(백만 배)  
더 효율적 (냉각 비용 제외)

속도 (Speed)

**수 나노초 (nanoseconds)**

칩 전체 통신 지연 시간

생물학적 뉴런보다 수백만 배 빠른 속도

이 기술은 '고밀도 연결성'과 '에너지 효율' 문제를  
근본적으로 해결할 잠재력을 가집니다.

# 경쟁이 아닌, 생태계의 완성

뉴로모픽과 양자 컴퓨팅 중 어느 것이 실리콘을 대체할 것인가? → 이는 잘못된 질문입니다.

경주용 자동차와 화물선 중 어느 것이 더 나은지 묻는 것과 같습니다.



## 뉴로모픽 컴퓨팅 (Neuromorphic Computing)

### 디지털 뇌 (Digital Brain)

- 영감: 인간의 뇌 (Human Brain)
- 작동 원리: 인공 뉴런과 시냅스를 통한 효율적인 정보 처리
- 최적 과제: 실시간 패턴 인식, 저전력 엣지 AI, 자율 시스템. 현실 세계와의 지능적 상호작용.



## 양자 컴퓨팅 (Quantum Computing)

### 현실 시뮬레이터 (Reality Simulator)

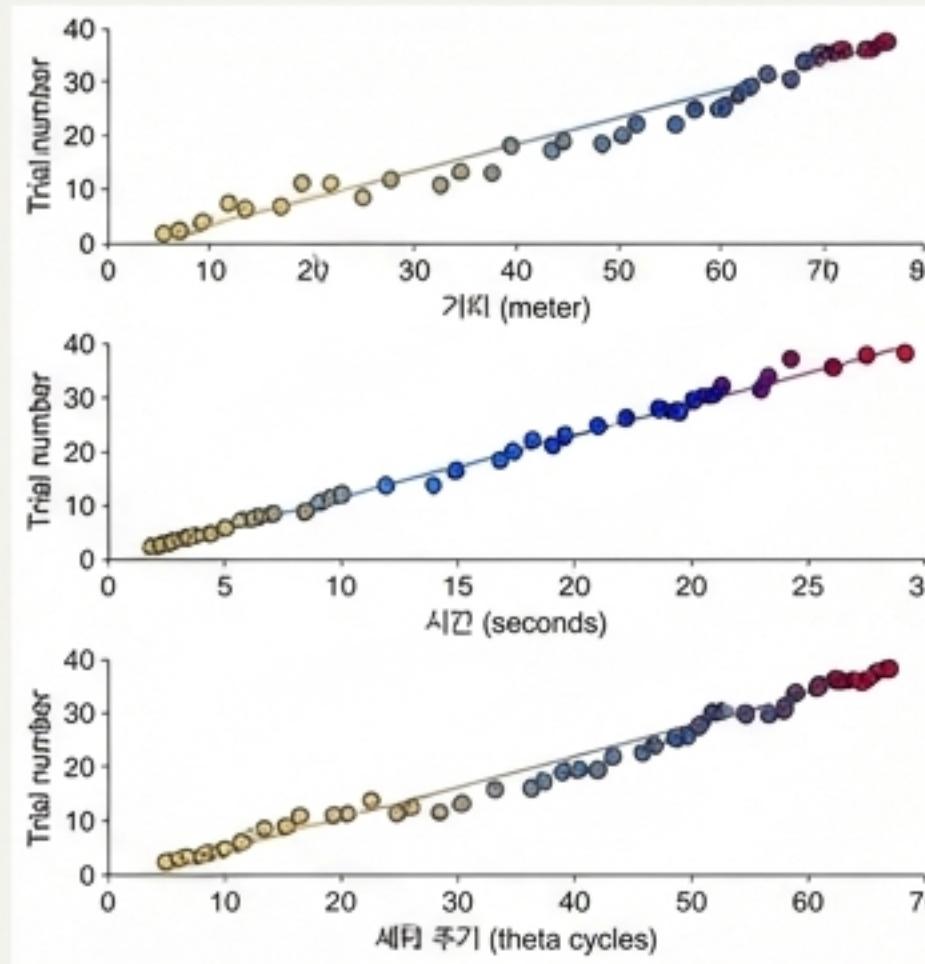
- 영감: 양자역학 (Quantum Mechanics)
- 작동 원리: 큐비트, 중첩, 얹힘을 이용한 방대한 가능성 동시 탐색
- 최적 과제: 신약 개발, 재료 과학 등 기존 컴퓨터로는 해결 불가능한 거대 최적화 및 시뮬레이션 문제.

## 미래의 모습: 협력적 생태계

두 기술은 서로를 대체하는 것이 아니라, 고도로 전문화된 처리 장치로 공존할 것입니다. 실리콘은 이들 전문 프로세서를 연결하는 안정적인 '결합 조직' 역할을 계속할 것입니다.

미래는 하나의 승리자가 아닌, 올바른 작업에 올바른 두뇌를 사용하는 것입니다.

# 공간과 시간의 종말: 뇌는 '순서'를 생성할 뿐이다



## 전통적 관점의 해체

우리는 뇌가 '무엇', '어디서', '언제'를 처리한다고 믿어왔습니다. 그러나 뇌에는 공간이나 시간을 위한 전용 센서가 없습니다. 이들은 측정 도구(자, 시계)에 기반한 인간의 발명품일 뿐입니다.

## 뇌의 실제 작동 방식: 순서 생성기 (The Brain as a Sequence Generator)

뇌가 시간과 거리를 계산하는 것으로 보이는 모든 현상은 '순차적인 세포 집합의 활성화' 또는 '신경 궤적(neuronal trajectories)'으로 설명될 수 있습니다.

해마(Hippocampus)는 '장소 세포'나 '시간 세포'를 갖는 것이 아니라, 사건들을 연결하는 범용 '순서 생성기' 역할을 합니다.

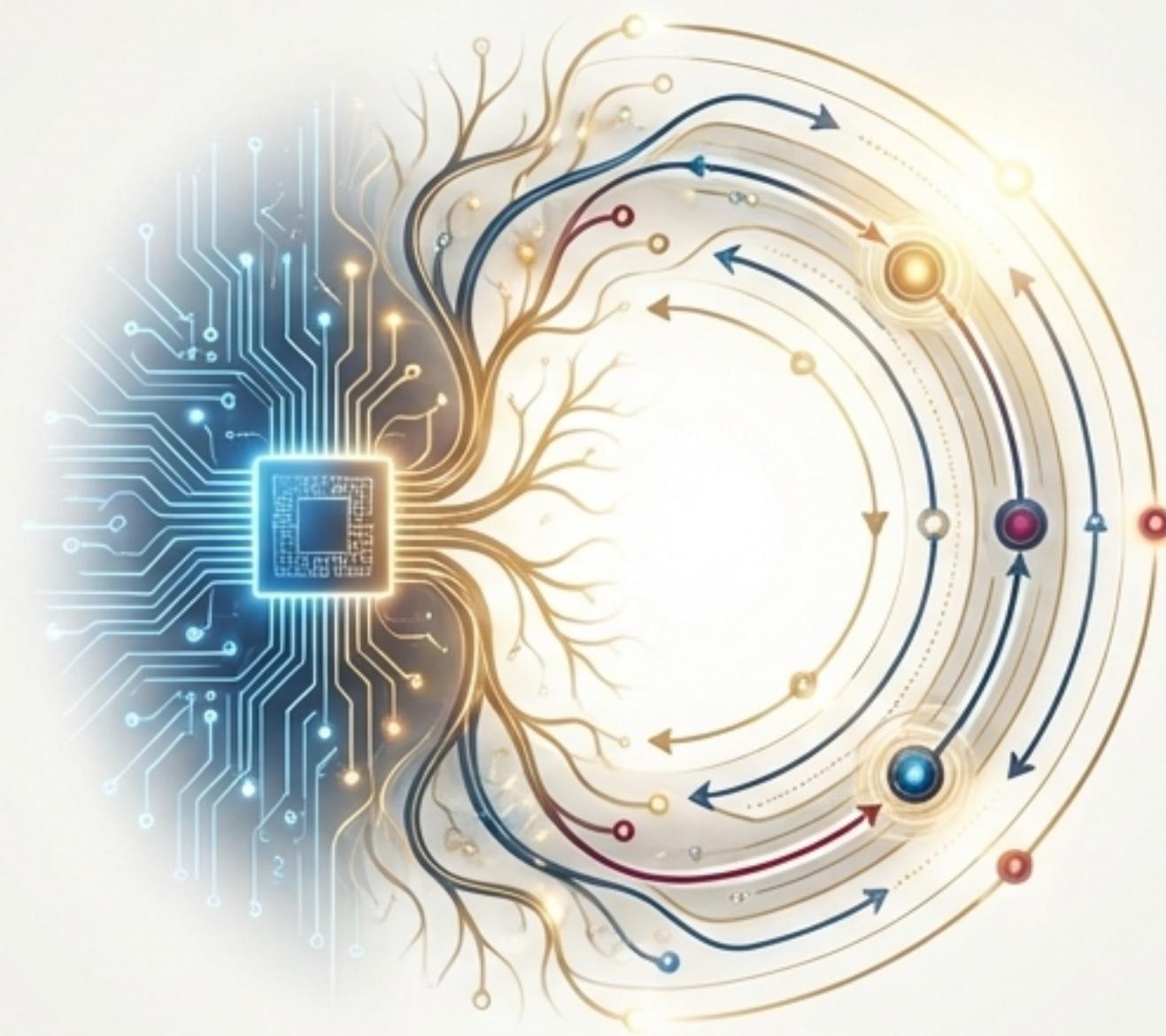


뇌는 외부 세계의 시공간을 표상하는 것이 아니라, 행동을 통해 생성된 내부의 순서적 구조를 통해 작동합니다. 이는 '내부-외부' 패러다임의 가장 심오한 함의입니다.

# 새로운 궤적의 시작

## 우리의 여정 요약 (Our Narrative Arc)

- 결합 있는 설계도에서 시작했습니다:  
우리는 폰 노이만 병목현상과 '외부-내부'라는 잘못된 뇌 모델에 갇혀 있었습니다.
- 진정한 청사진을 발견했습니다:  
'내부-외부' 패러다임은 뇌가 행동을 통해 의미를 창조하는 능동적 행위자임을 밝혔습니다.
- 새로운 기술의 세계를 건설하고 있습니다:  
뉴로모픽 컴퓨팅은 이러한 원리를 하드웨어와 소프트웨어로 구현합니다.
- 미래를 향한 탐험은 계속됩니다: 글로벌 경쟁과 미래 기술 융합은 컴퓨팅의 새로운 생태계를 예고합니다.



## 최종 메시지 (The Final Message)

뉴로모픽 컴퓨팅은 더 나은 AI를 만드는 것을 넘어, 지능에 대한 우리의 접근 방식을 근본적으로 재정의합니다.

미래의 지능은 수동적인 '표상(representation)'이 아닌, 능동적인 '행동(action)'과 내부적으로 생성된 '순서(sequence)'에 기반할 것입니다.

우리는 단순히 뇌를 모방하는 것이 아니라, 뇌가 작동하는 첫 번째 원칙으로부터 지능을 구축하는 새로운 궤적 위에 서 있습니다.