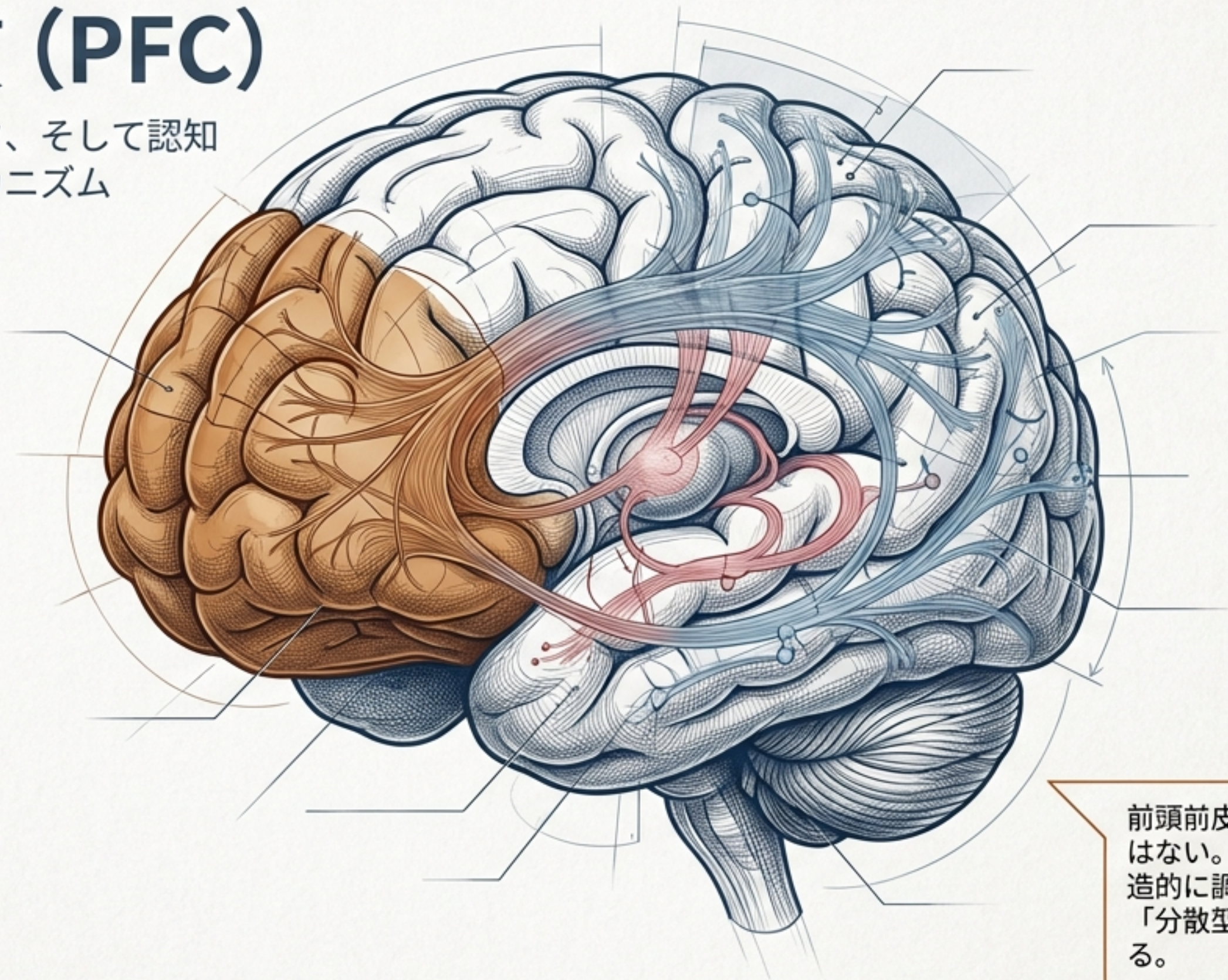


マルチスケールで解き明かす 前頭前皮質 (PFC)

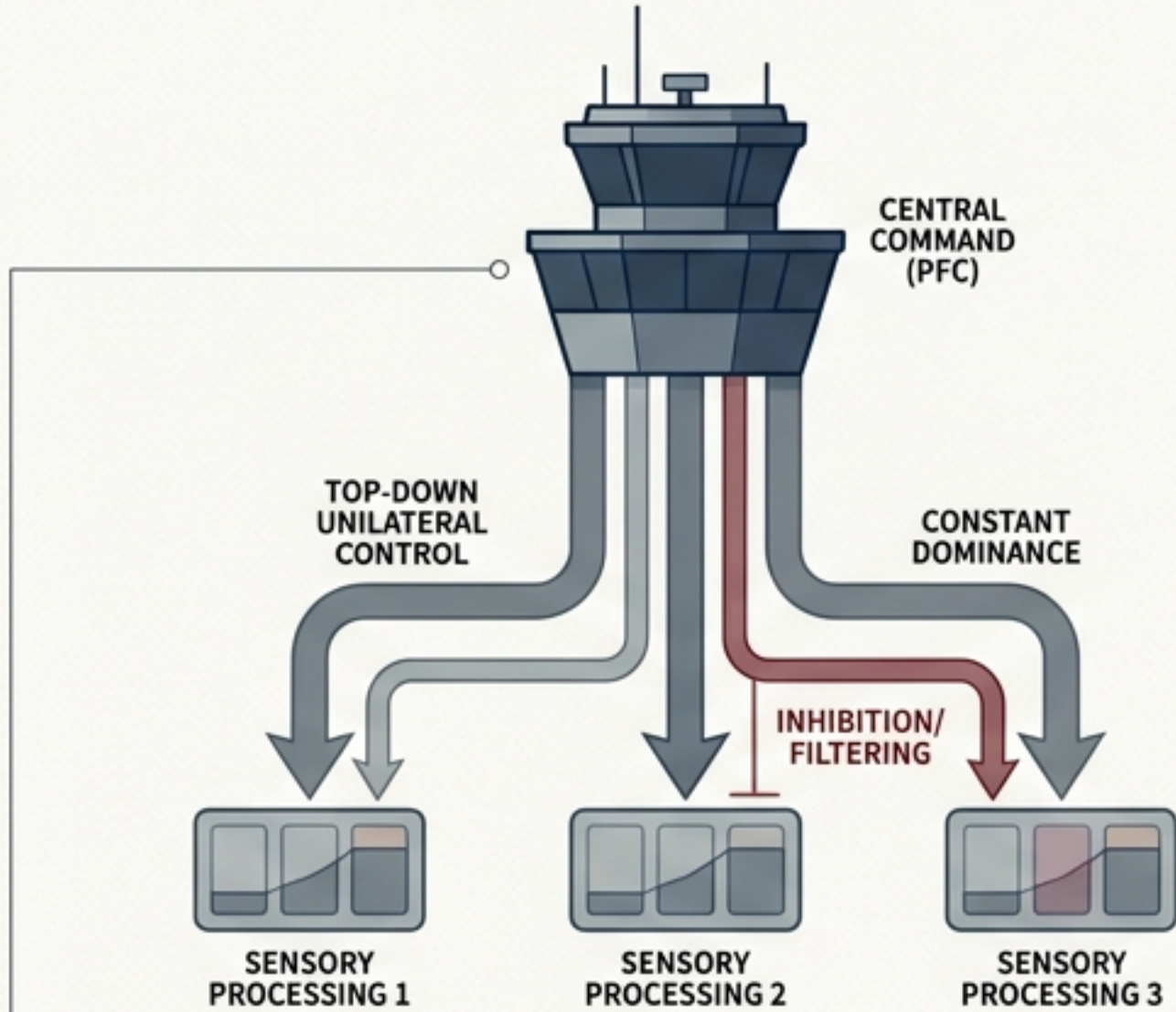
層構造、白質ネットワーク、そして認知
における分散型制御のメカニズム



前頭前皮質は絶対的な「司令塔」ではない。それは、状況に応じて構造的に調整され、一時的に機能する「分散型インターフェース」である。

パラダイムシフト：司令塔からインターフェースへ

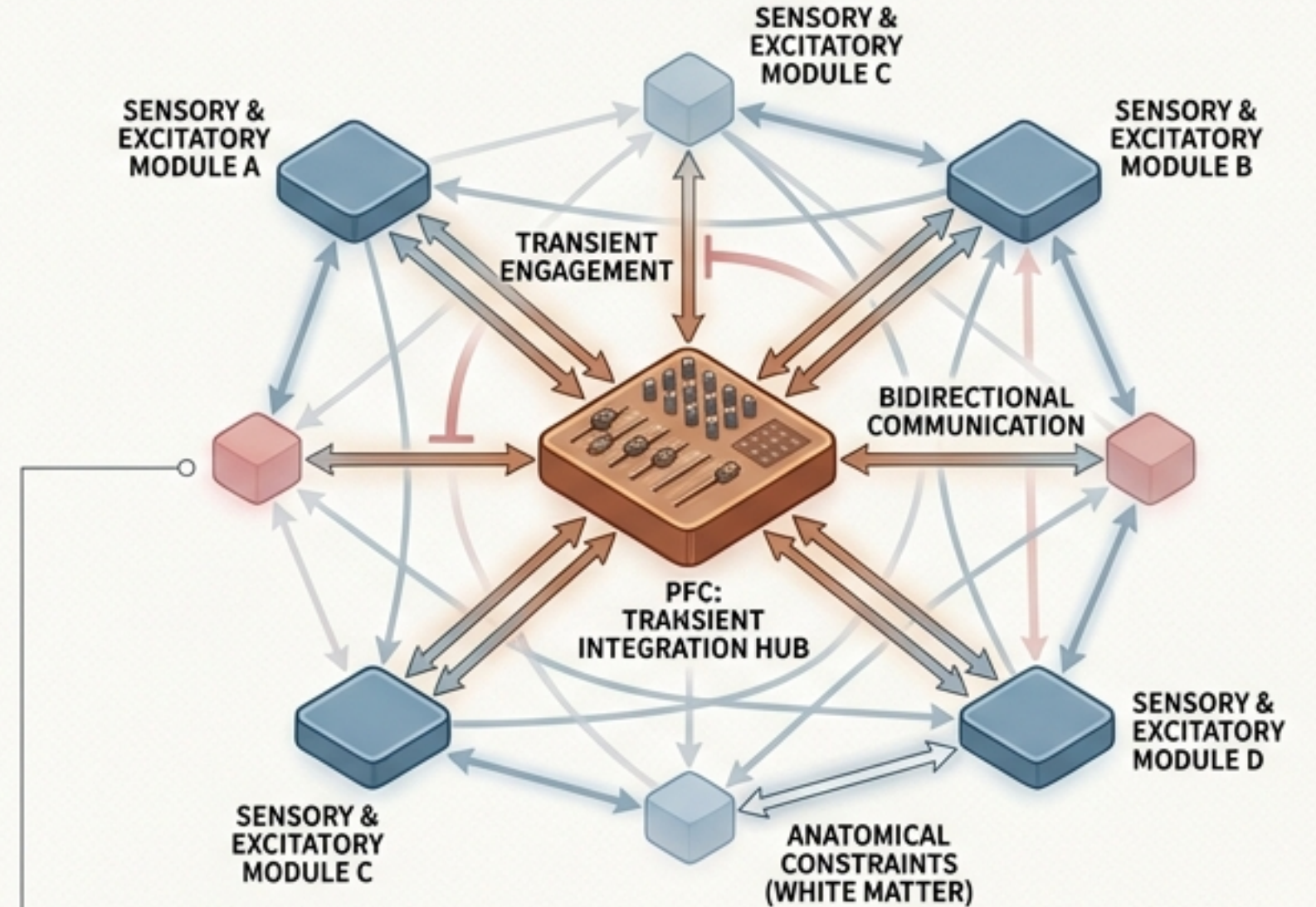
過去の定説



局在的本質主義 (Regional Essentialism)

- PFCを独立した「中央実行系」のモジュールと見なす。
- トップダウンでの一方的な制御。
- 常に稼働し、すべての認知活動を支配する。

現代の神経生物学的視点

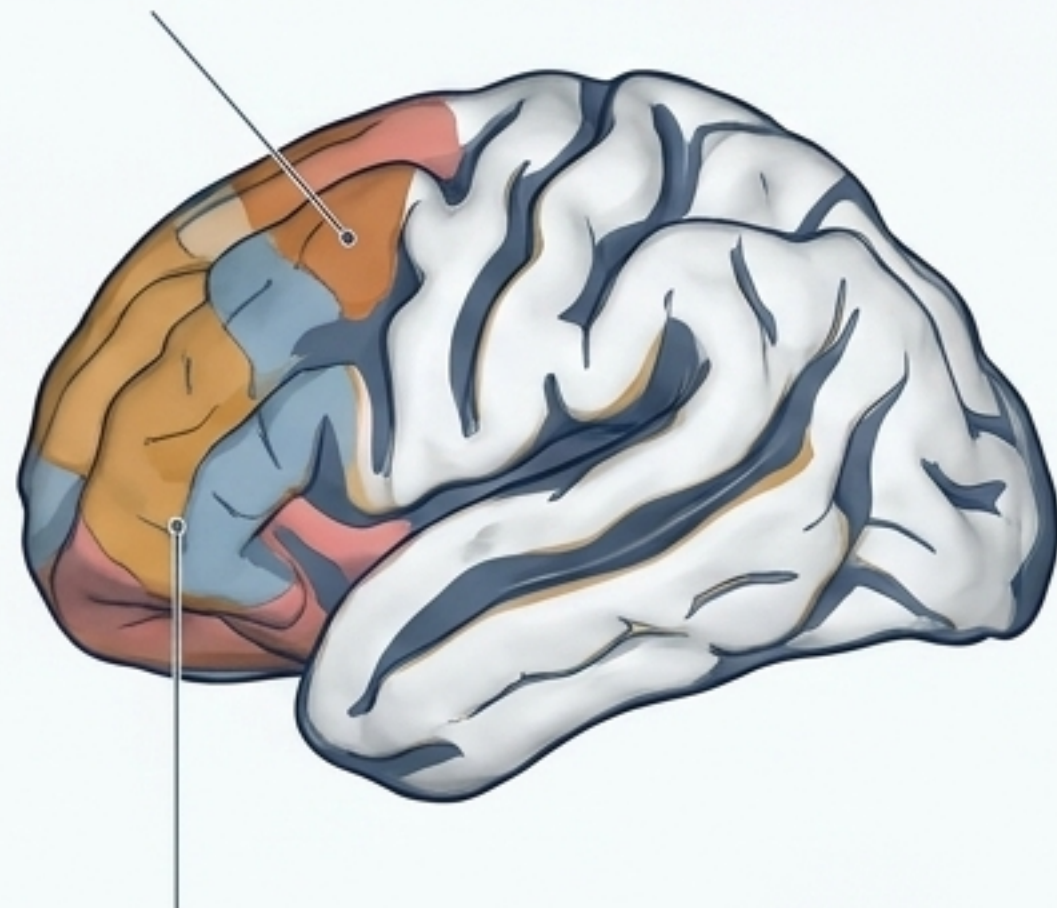


ネットワーク制約型の分散ノード (Network-Constrained Node)

- 感覚器系の高速な処理を、PFCの「遅い統合」で補完する。
- タスクの要求に応じて一時的 (Transient) に関与する。
- 解剖学的な接続 (白質) による厳しい制約を受ける。

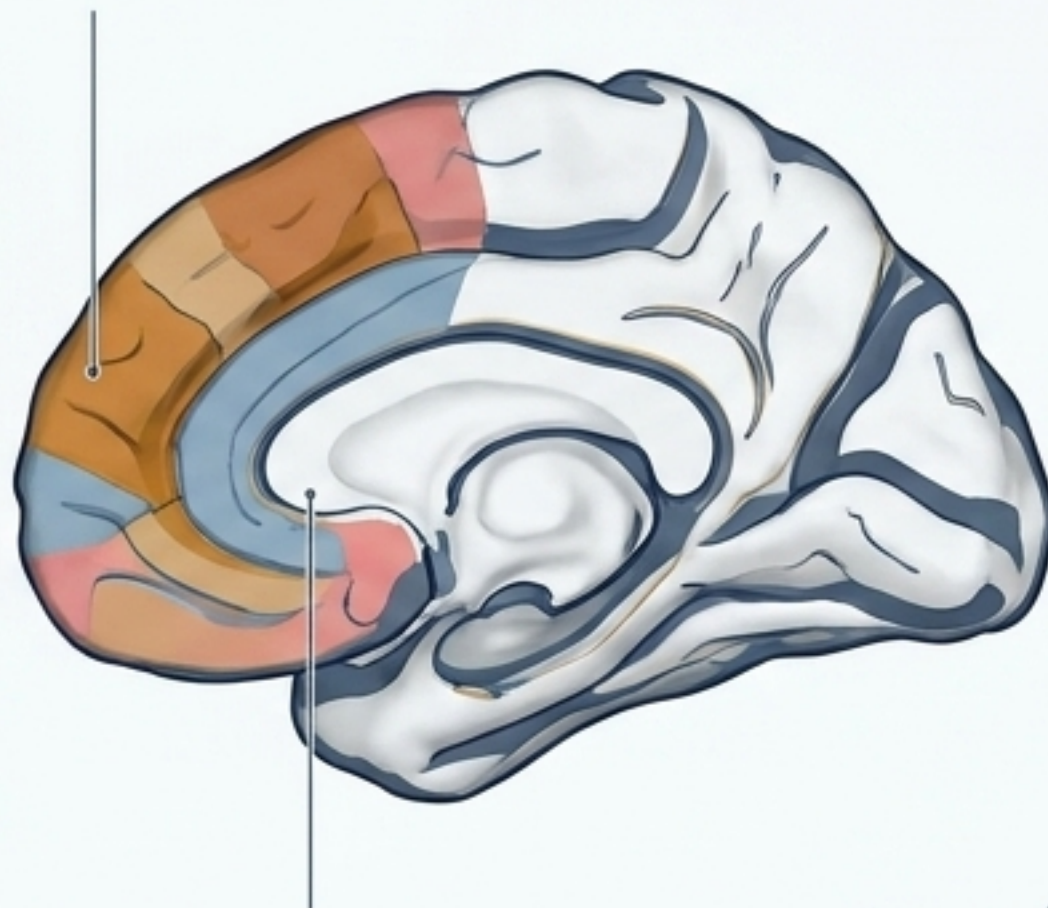
PFCの構造的座標系 (HCP-MMPアトラス)

背内側 (dmPFC):
BA 8, 9 (内側)



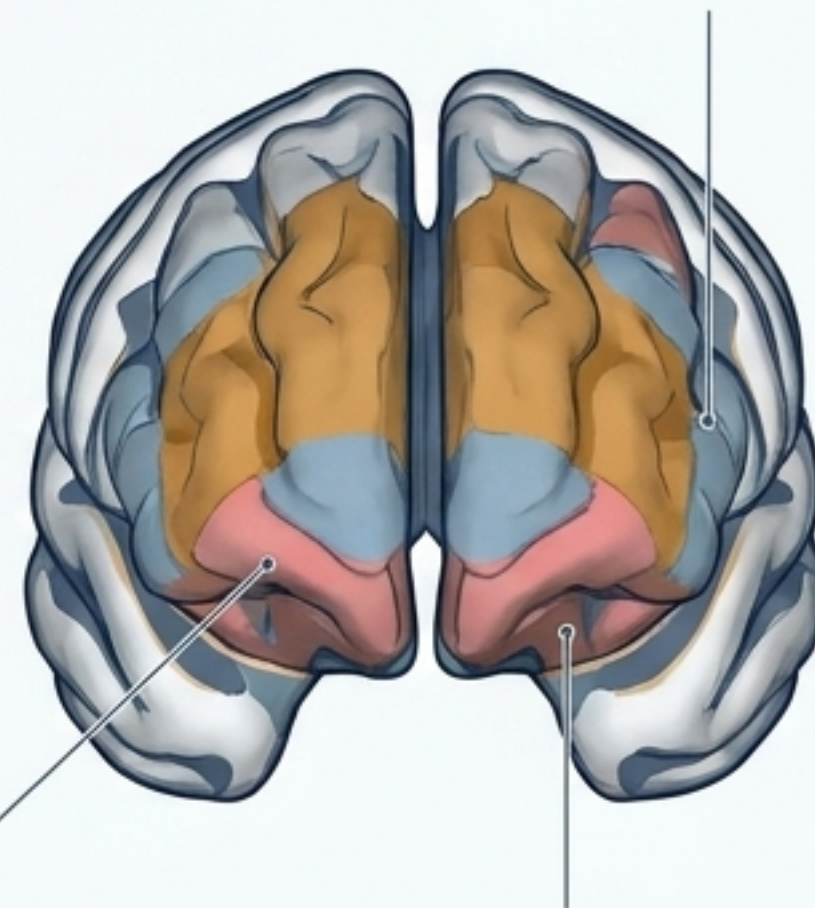
背外側 (dlPFC):
BA 46, 9/46, 8, 9 (外側)

前頭極 (FPC):
BA 10



前帯状皮質 (ACC)

腹外側 (vlPFC):
BA 44, 45, 47/12



腹内側 (vmPFC):
BA 25, 10/32 (腹側)

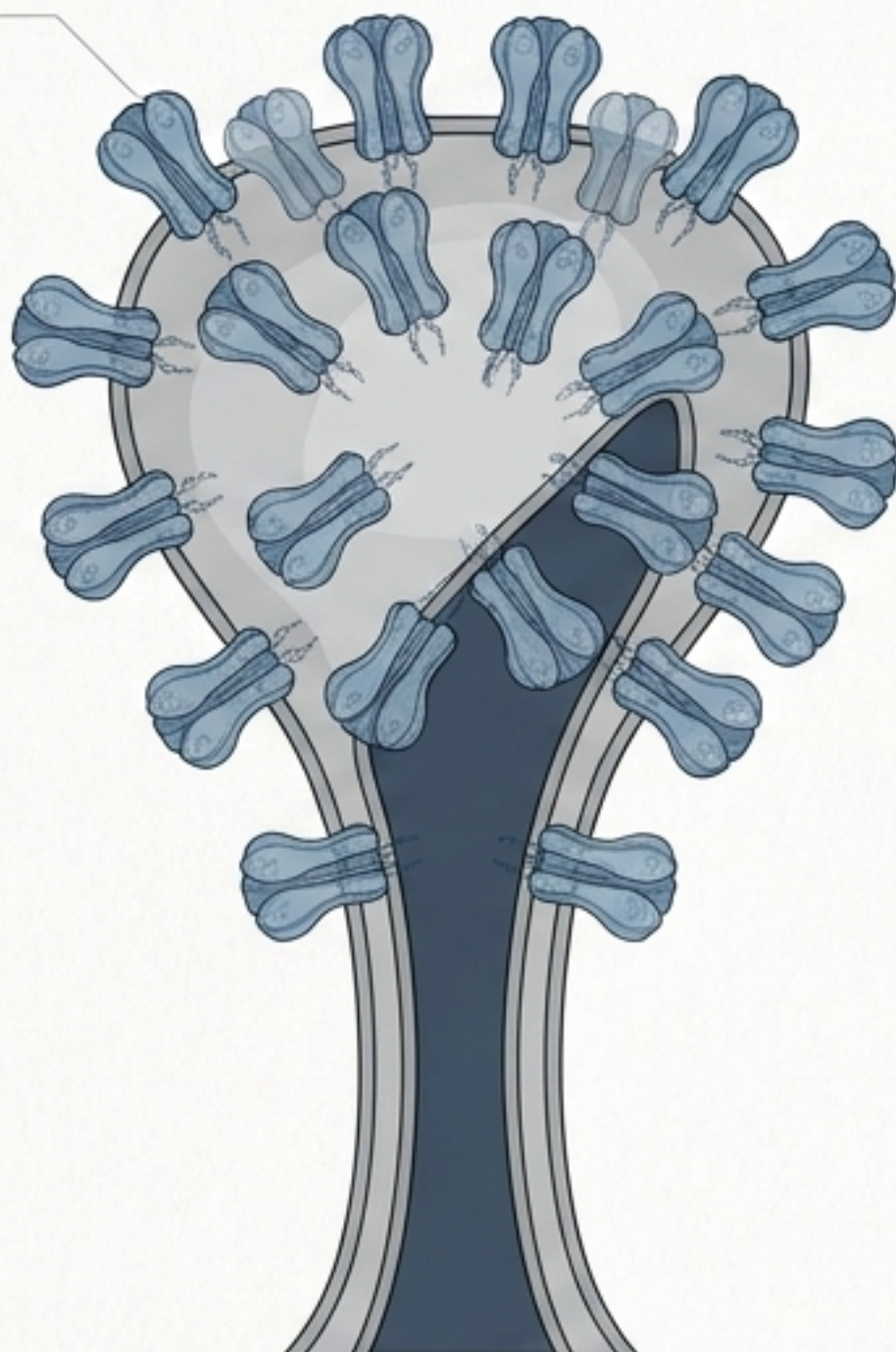
眼窩前頭 (OFC):
BA 11, 13, 14

独立した「特権的なモジュール」を特定するためではなく、大規模ネットワークが一時的に動員する「構造的座標」を定義するためのマッピング。

SCALE 1 (Micro) - 分子レベルのパラメータ化

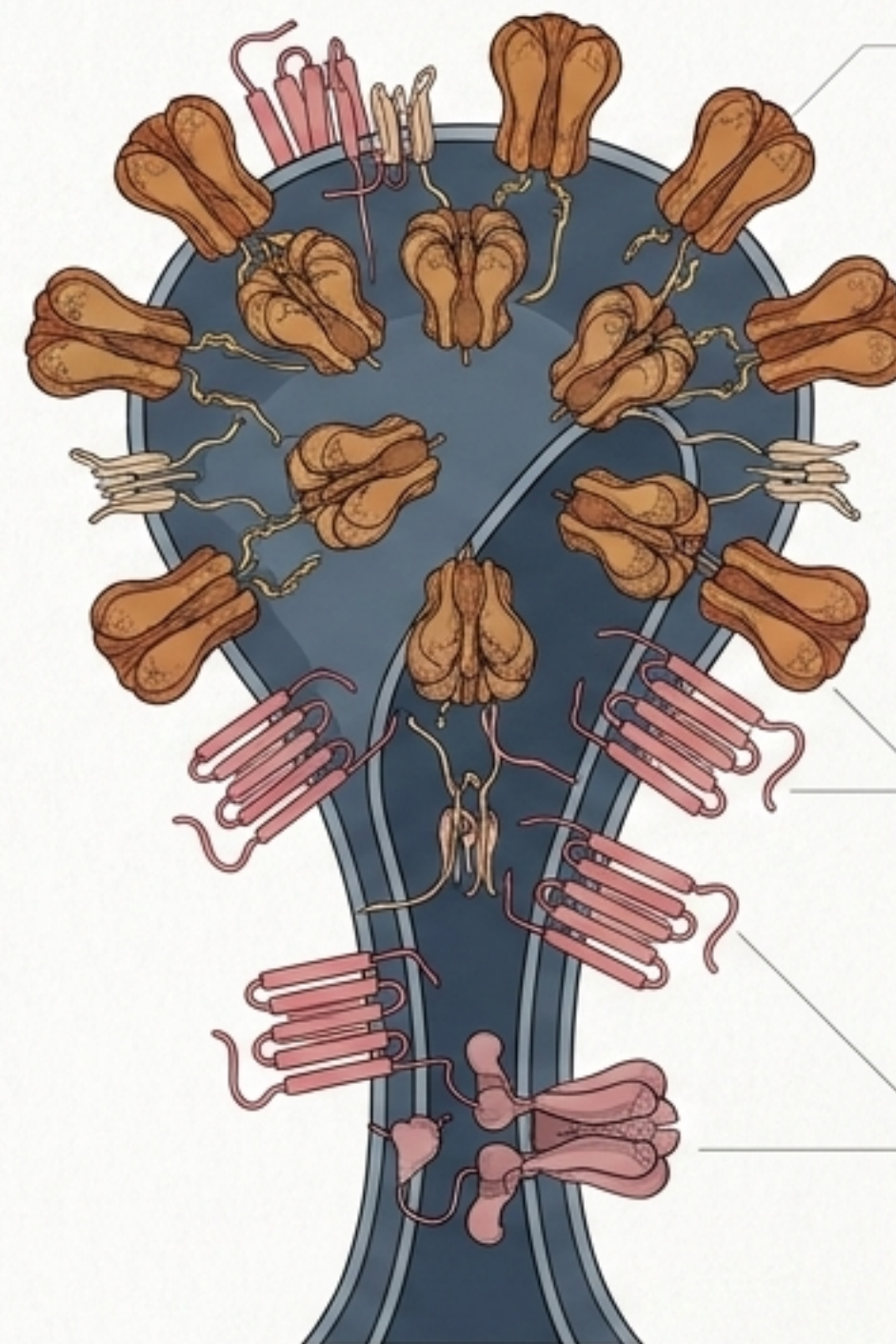
感覚野のスパイク (Sensory)

AMPA受容体主導の高速な同期。即時的な刺激処理に最適化。



PFCのスパイク (Prefrontal)

NMDA/AMPA比が高い。持続的な発火（遅いタイムスケール）を生み出す。

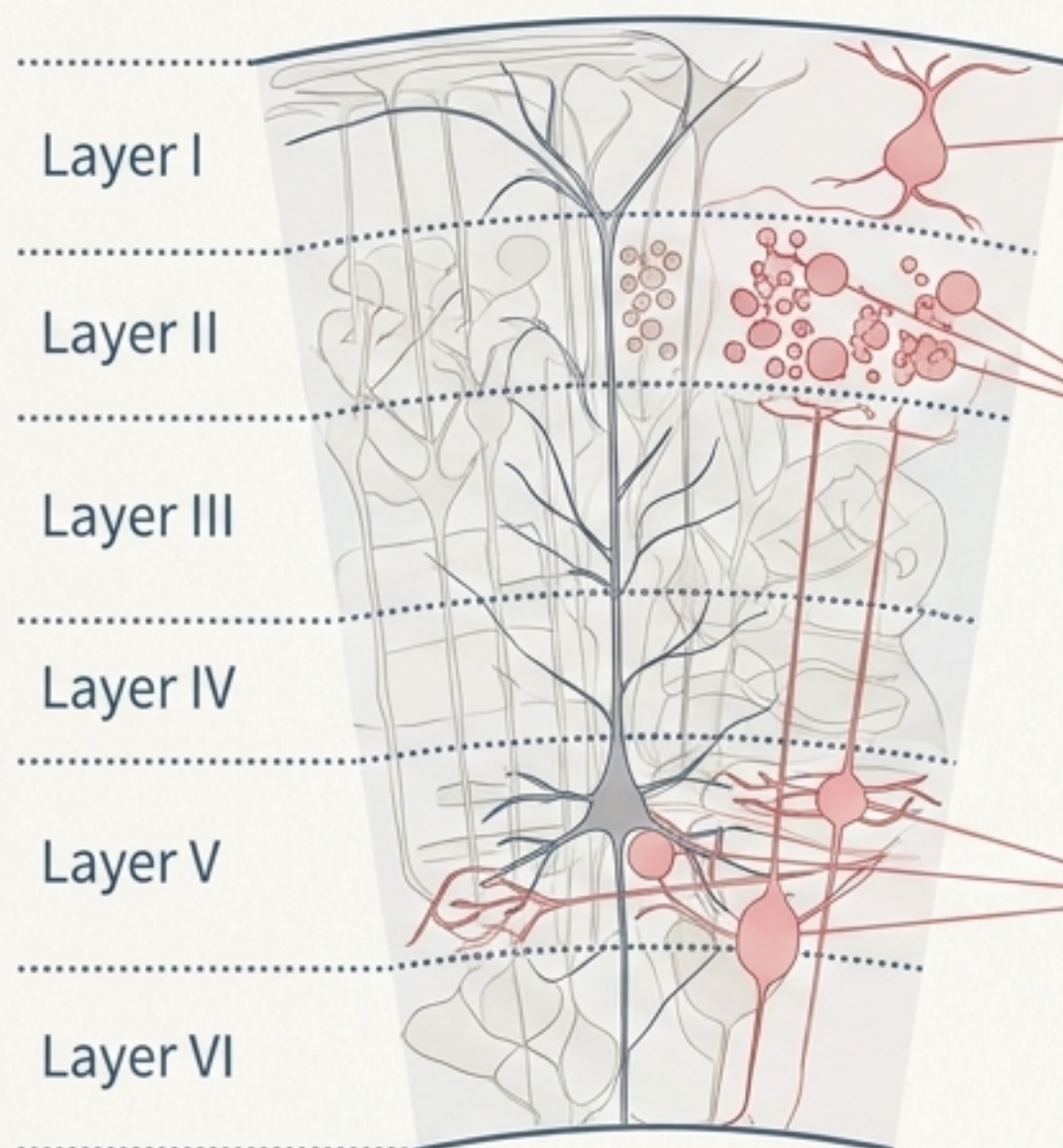


D1受容体 (ドーパミン): 入力信号を動的にフィルタリング（逆U字型プロファイル）。

HCNチャネル: $\alpha 7$ ニコチン受容体と連携し、信号の漏れを防ぐ「シールド」を形成。ワーキングメモリの情報を保護する。

SCALE 1 (Micro) - 層構造のゲーティングと介在ニューロン

前頭前野 (Prefrontal)



第 I 層: Rosehip細胞 (RC)

- ノイズの隣接カラムへの漏れを抑制。

**第 II/III 層: カルレチニン (CR) および
カルビンディン (CB)**

- 受容体による微細なフィルタリング。

**深層 (V/VI): 水平ビーズ細胞 (HBC) /
特殊なDBC**

- α/β 波を生成し、表層の γ 波を制御・
保護する。

感覚野 (Sensory)



表層は感覚的な「更新 (Gamma)」を駆動し、深層は情報を保護する「シールド (Alpha/Beta)」を形成する。

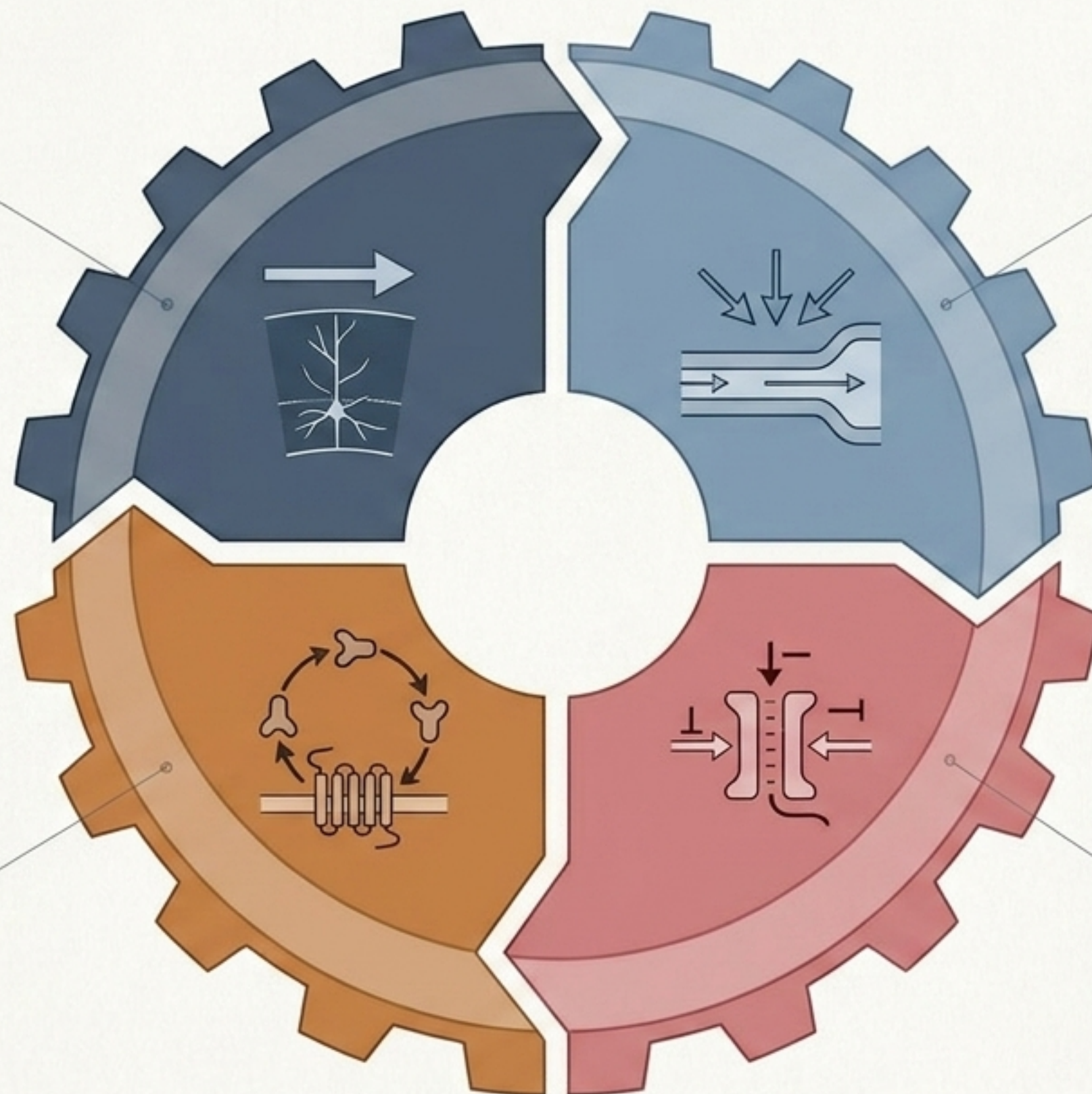
実行機能の再定義：具体的な物理メカニズムへ

4. フィードバック (Feedback)

深層 (V/VI) からの出力。
局所で安定化された状態の
外部へのエクスポート。

3. 保持 (Maintenance)

NMDA/HCNチャネルによる
神経調節と、受容体に依存す
る反復性の持続。



1. 収束 (Convergence)

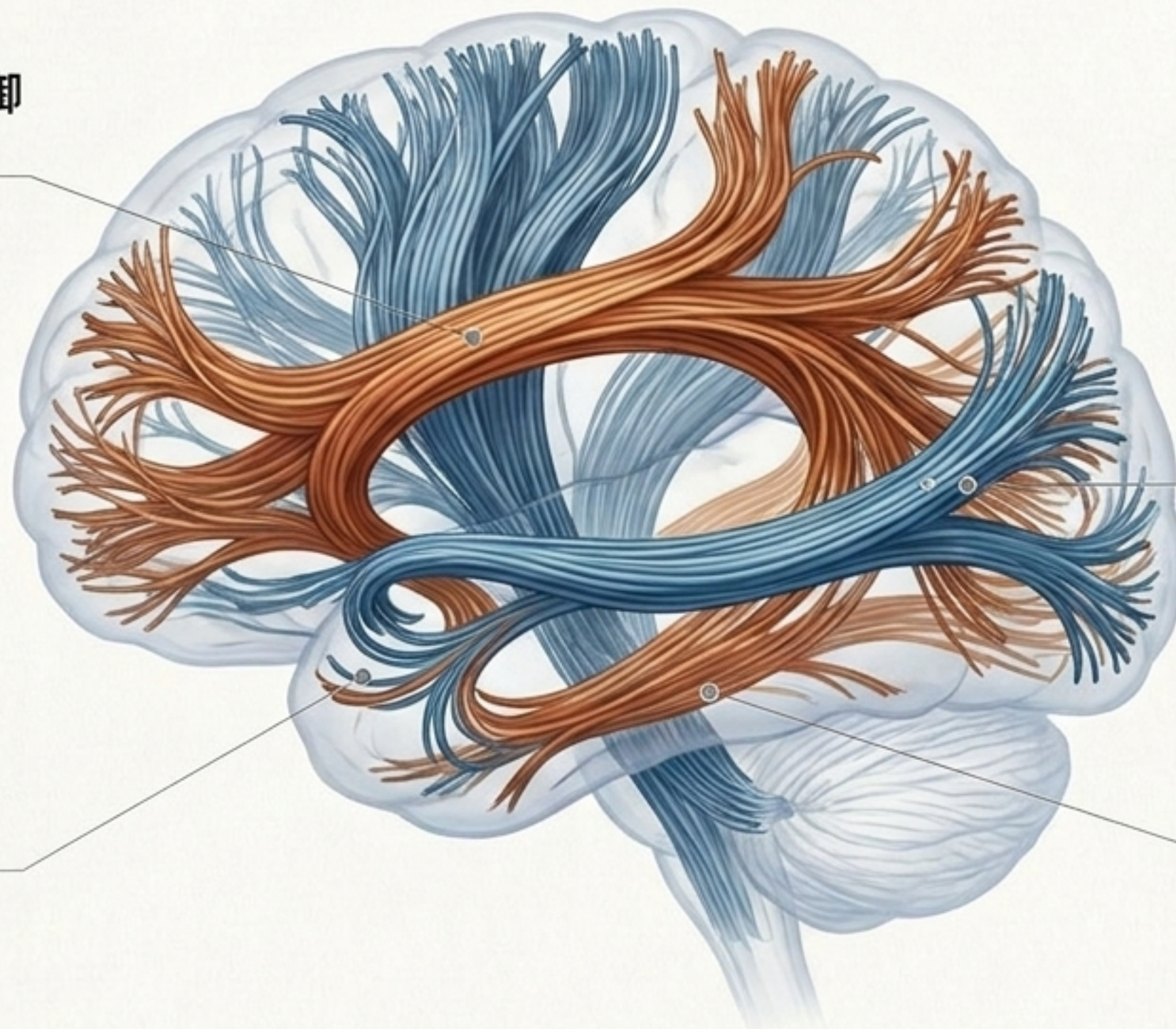
視床皮質ループ (MD, VAmc)
から第IV層への大規模な入
力。

2. フィルタリング (Filtering)

介在ニューロン (PV, CB,
CR) による入力の動的ゲー
ティング。

SCALE 2 (Meso) - 構造的制約としての「白質ネットワーク」

上縦束 (SLF I/II):
ワーキングメモリと注意の制御
(前頭・頭頂ネットワーク)。



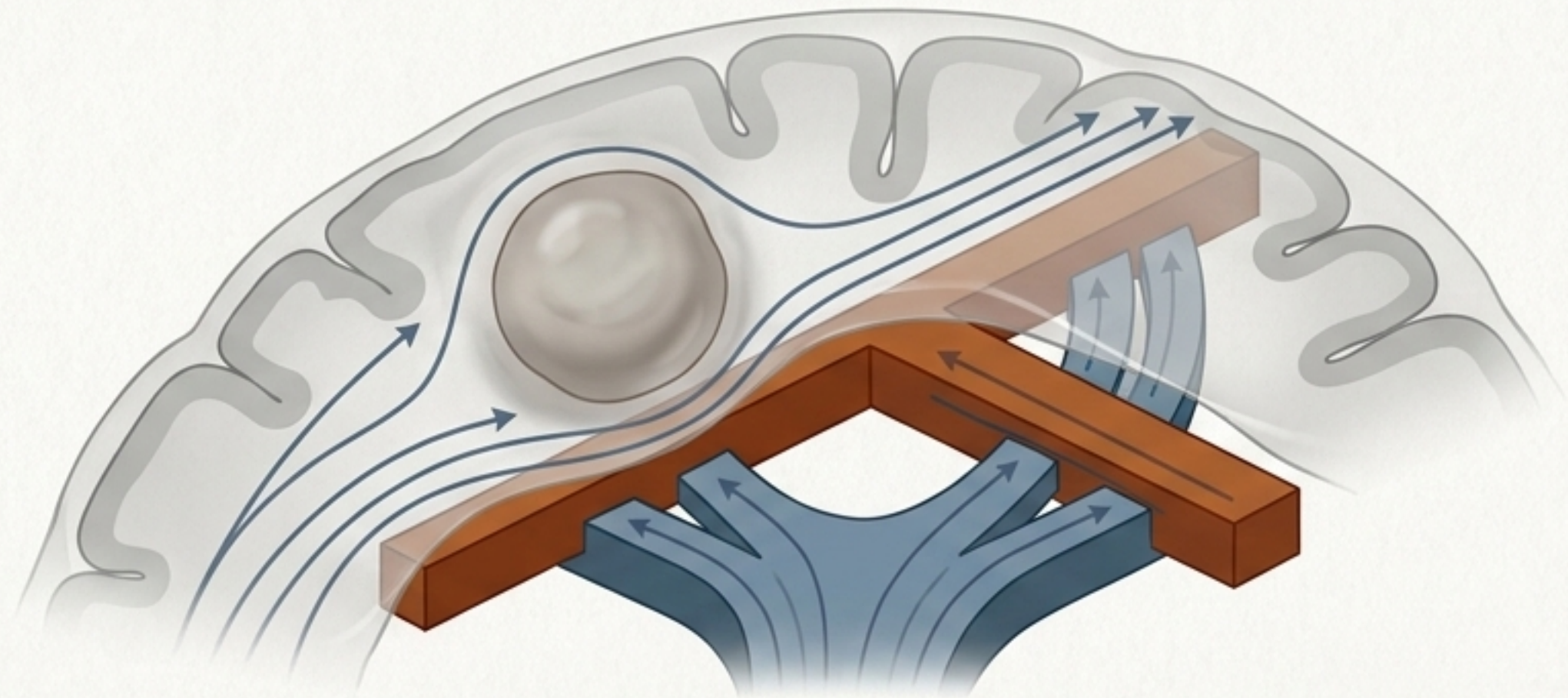
認知機能の真の
ボトルネックは
白質にある。

下前頭後頭束 (IFOF):
意味処理、視覚誘導行動、
および非言語的統合。

鉤状束 (UF):
記憶検索、価値評価、社会的
情動機能 (前頭・側頭
ネットワーク)。

鉤状束 (UF):
記憶検索、価値評価、社会的
情動機能 (前頭・側頭
ネットワーク)。

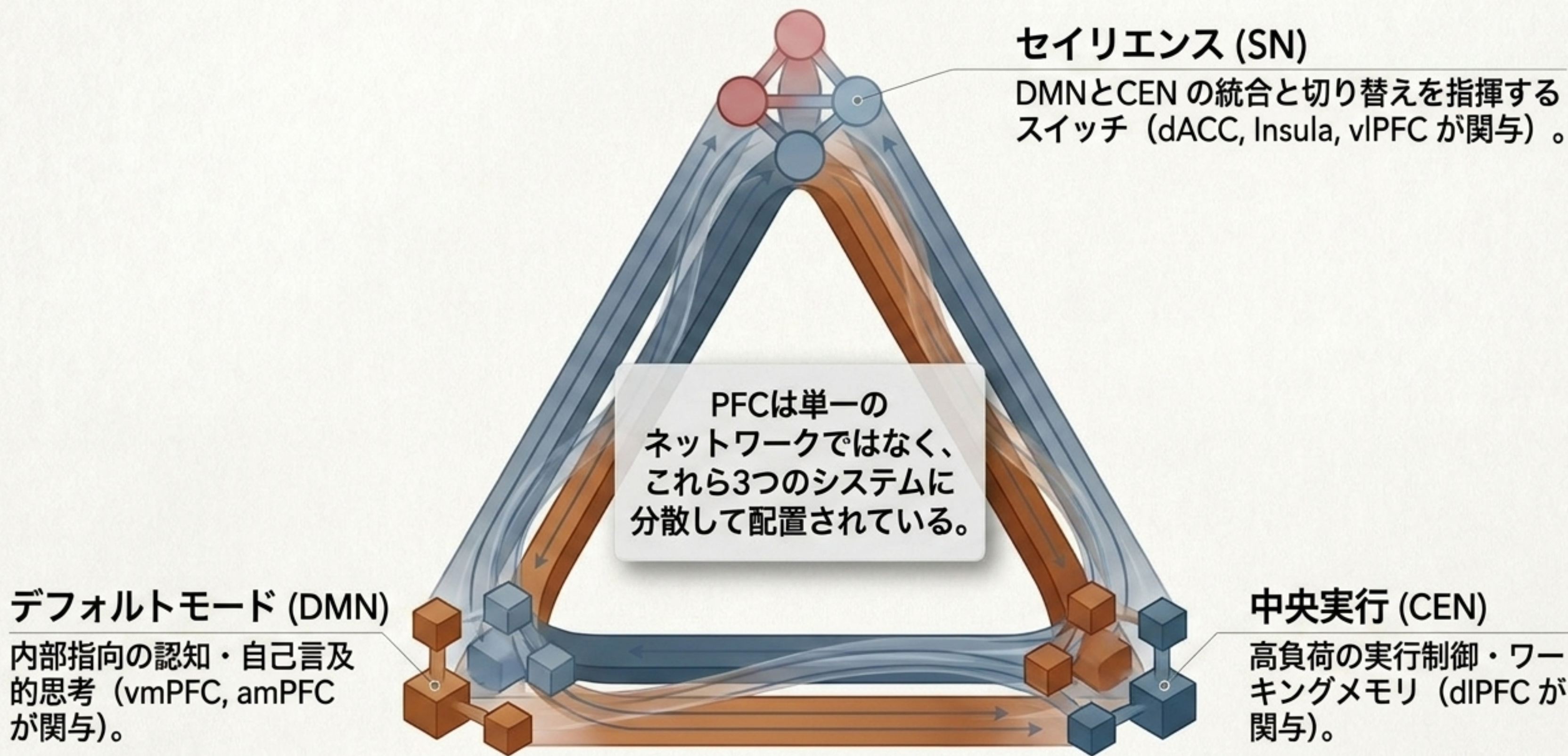
可塑性のパラドックス（脳腫瘍からの教訓）



古い視点 (厳密な局在主義)	過度な楽観論 (無制限の機能移行)	本作の視点 (ネットワーク制約型の再構築)
└ PFCが損傷すれば、実行機能は完全に失われる。	└ 残存するあらゆる脳領域がPFCの機能を完全に代替できる。	認知機能は維持され得るが、それは「白質の境界」と「残存する微小回路の互換性」に厳密に依存する。

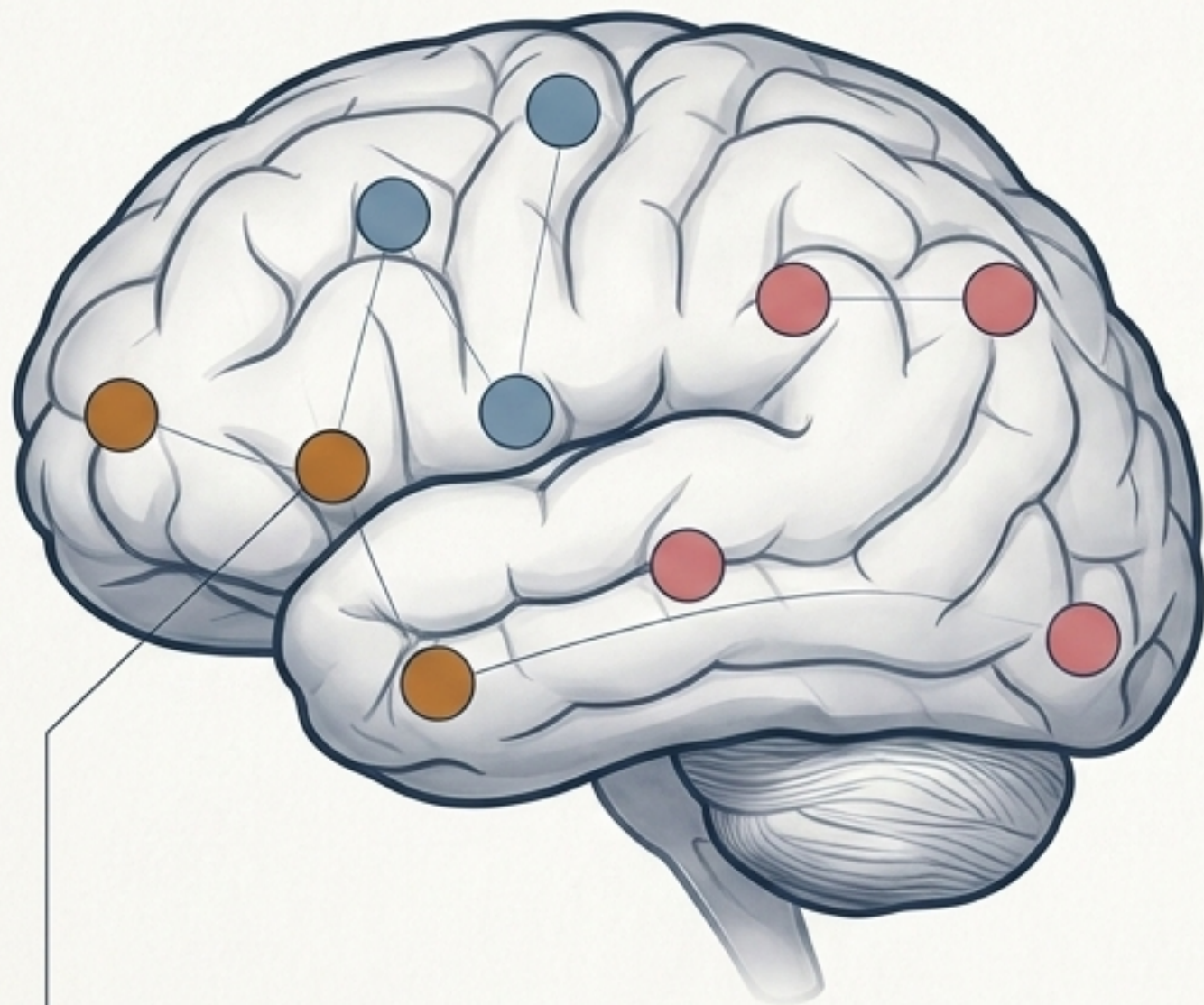
白質の「橋」が無傷であれば機能は迂回できる。橋が破壊されれば認知は破綻する。 NotebookLM

SCALE 3 (Macro) - 3大ネットワークの協調関係



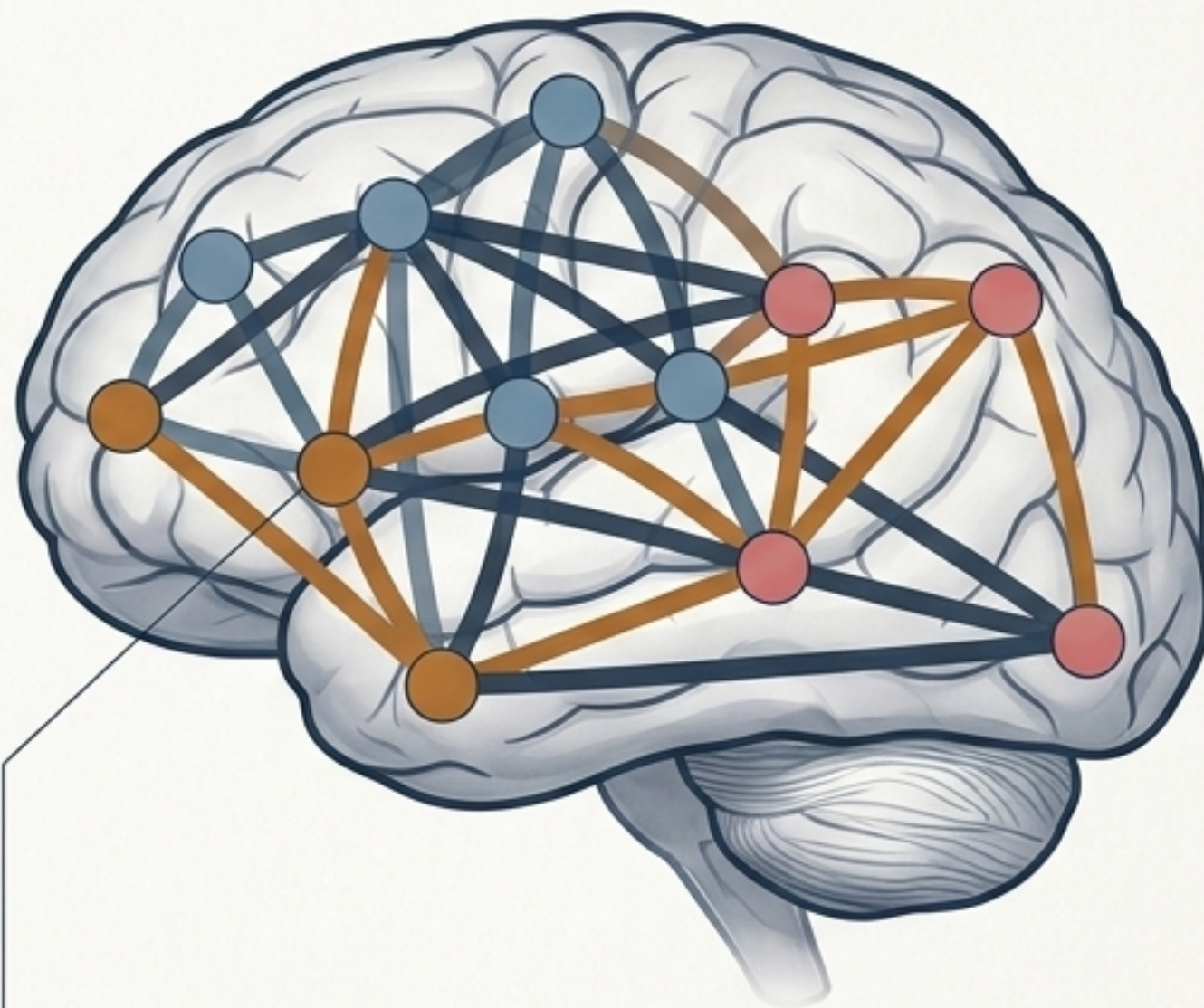
一時的な動員：分離 (Segregation) と統合 (Integration)

分離 (Segregation)



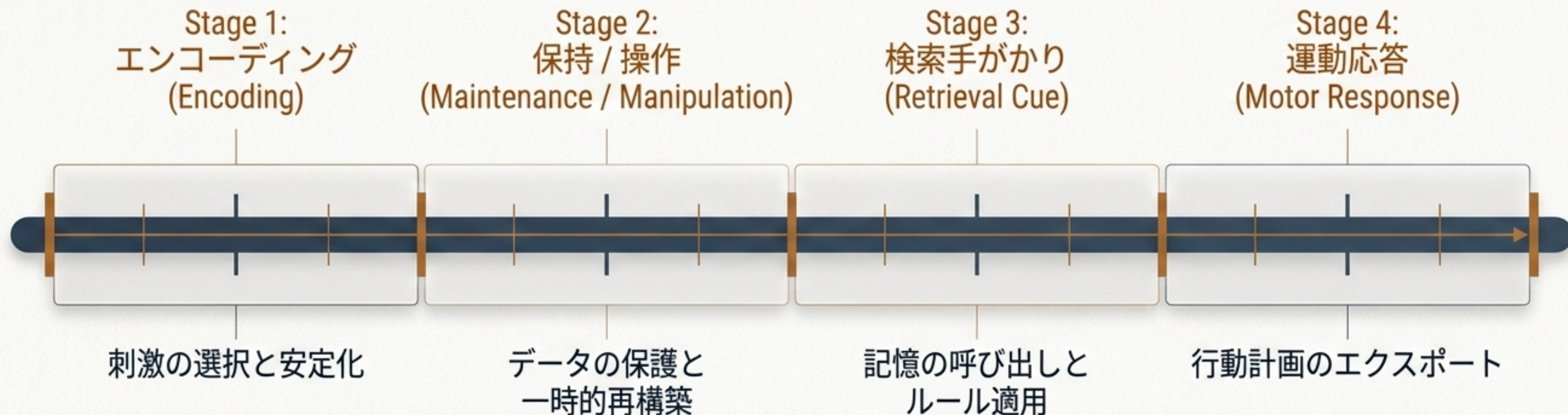
休息時や単純なルール適用時。
ネットワーク同士の干渉を防ぎ、代謝コストを抑える。
PFCの関与は最小限。

統合 (Integration)



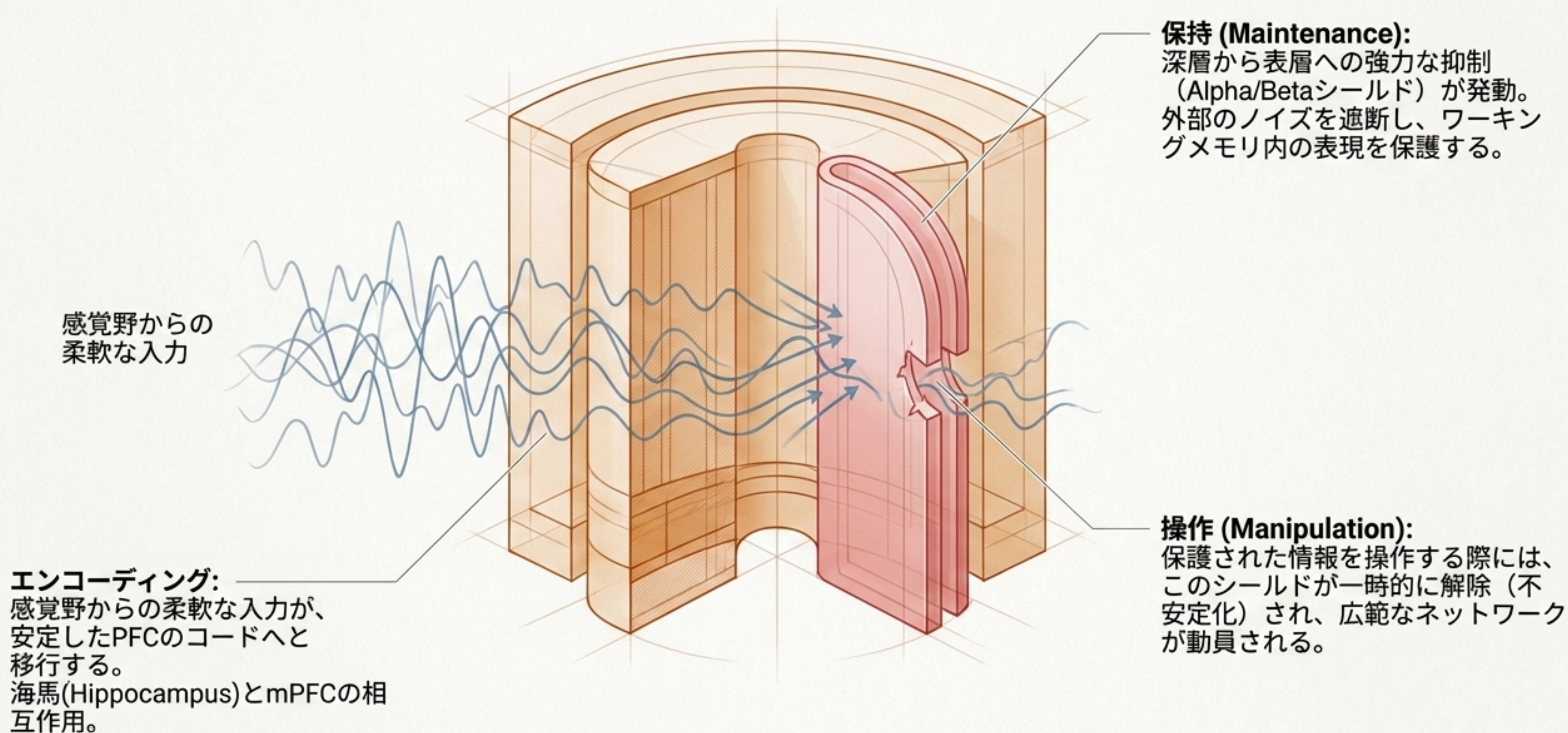
複雑なワーキングメモリや創造的タスク。
SN (セリエンス) の主導により、CENとDMNが協調。
PFCは「状況依存的なノード」としてシステム全体を一時的に統合する。

SCALE 4 (Temporal) - 認知ステージに依存したPFCの関与

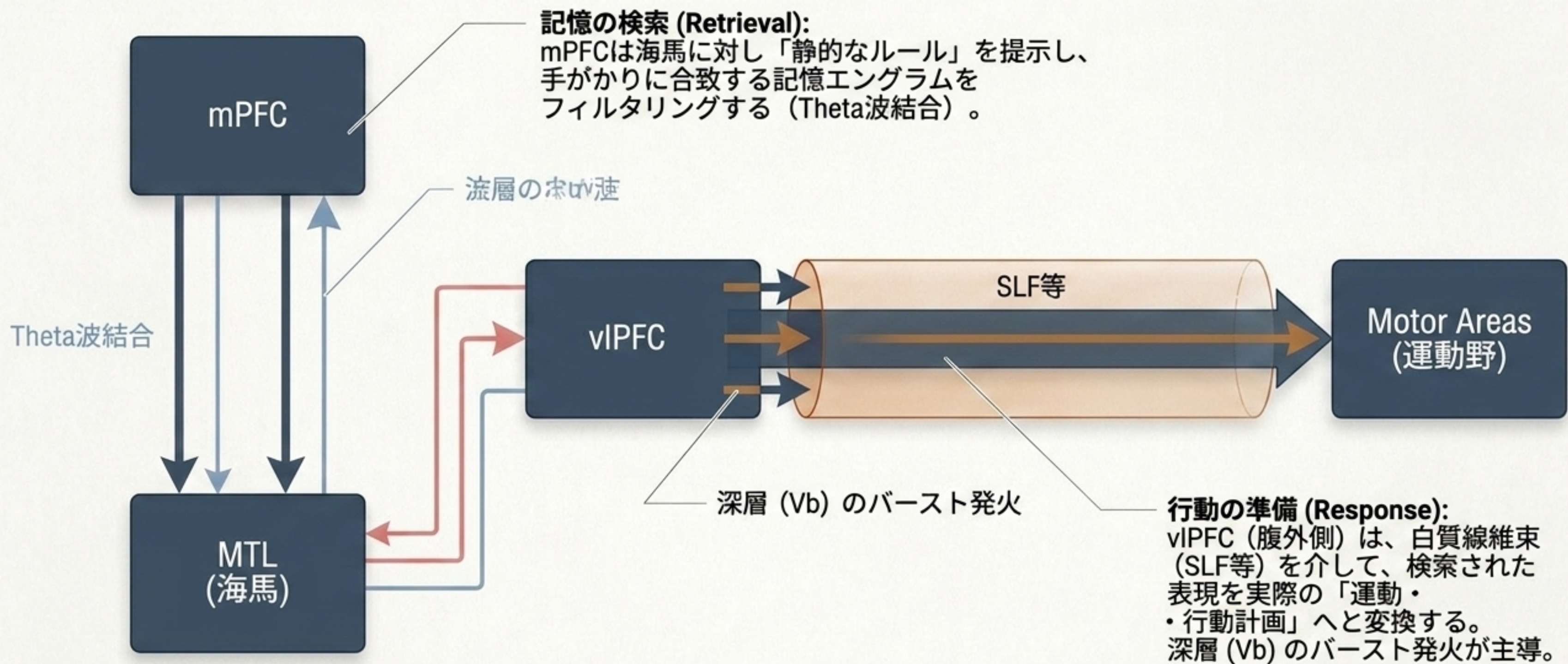


PFCの特徴的な機能（収束・保持・フィードバック）は、静的に常時オンになっているのではなく、時間経過に沿ってミリ秒単位で分散配置されている。

Stage 1 & 2: エンコーディングと情報の保持（シールド効果）



Stage 3 & 4: 検索と応答（状態のエクスポート）



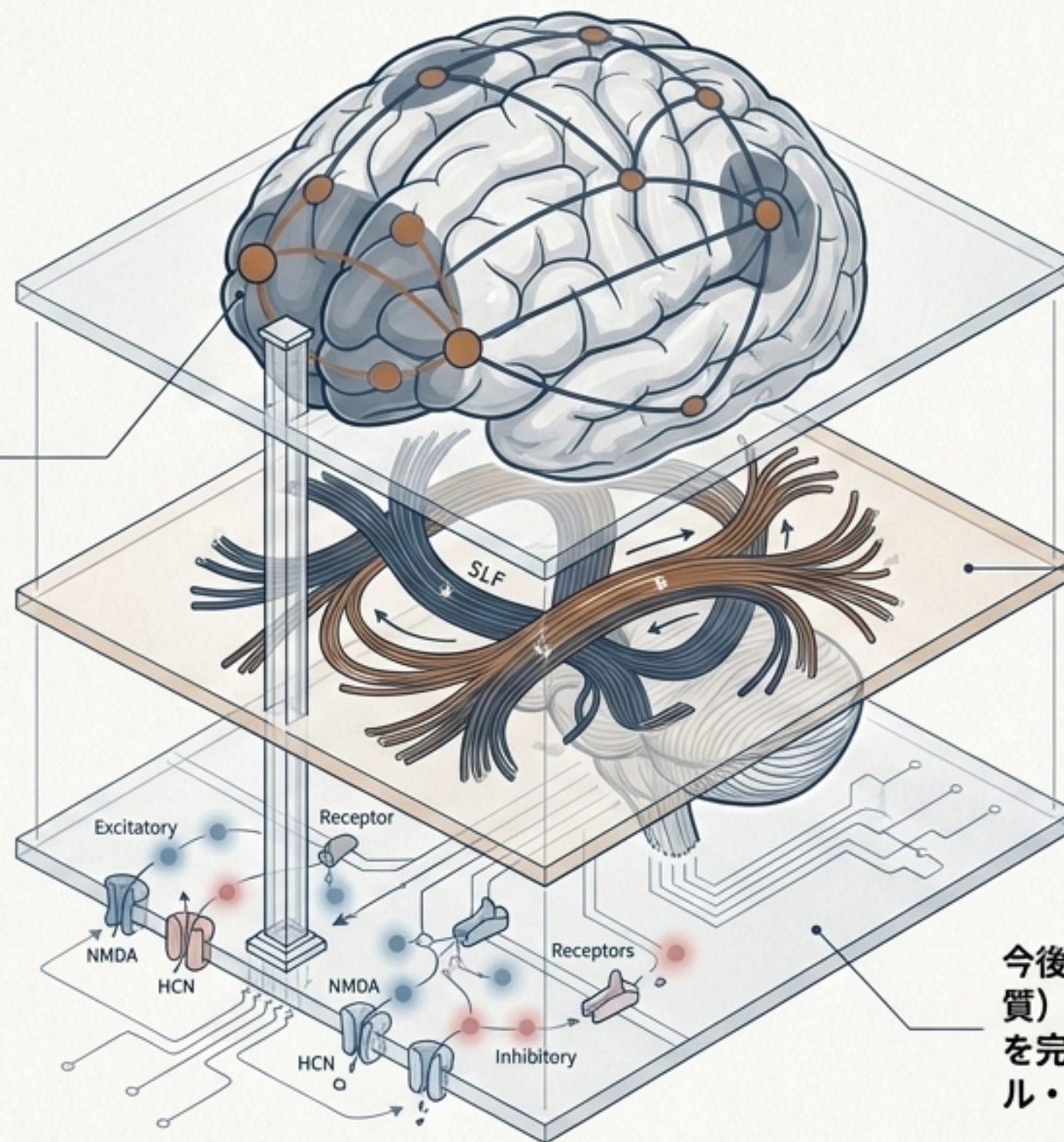
総合パラダイム：時空間マルチスケール・マトリックス

	エンコード	保持	検索	応答
分子・回路 (Micro)		NMDA-HCNシールド発動、 深層からの α/β 波抑制。		
白質線維 (Meso)				SLF/弓状束を通じた 運動野への出力。
ネットワーク (Macro)			mPFCと海馬の θ 波 クロスカップリング。	

認知とは、特定の「場所」で起こるのではなく、これらの多層的なスケールが「時間」とともに完璧に整列した時に創発する現象である。

結論と今後の展望

PFCは「絶対的な統治者」ではなく、「構造的に制約された分散型インターフェイス」である。



脳の局所的（Where）なマッピングから、時空間における創発（How）へのシフト。

今後の課題: 分子レベルの層構造、トラクト（白質）の動的動員、および認知ステージ間の相互作用を完全にリンクさせる「真の時空間マルチスケール・アトラス」の構築。

認知の本質は、空間的な局在化ではなく、時空間を横断する動的なオーケストレーションにある。