



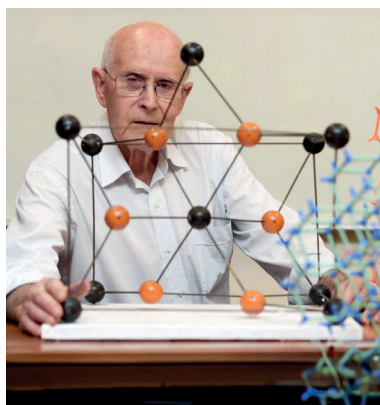
László Krisztina

# Kémiai Nobel-díj, 2025

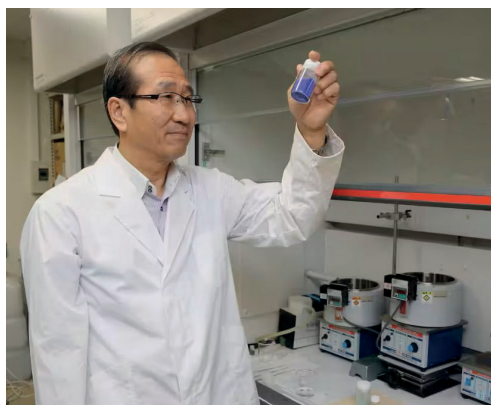
**A** 2025. évi kémiai Nobel díjat három ország három tudósa kapta – Richard Robson angol–ausztrál vegyész, a Melbourne-i Egyetem kémiaprofesszora; Susumu Kitagawa (Kitagawa Szusumu), a Kiotói Egyetem vegyészprofesszora; és a Kali-

forniai Egyetem berkeley-i kampuszán kutató palesztin–amerikai Omar M. Yaghi – a fémorganikus térhálók kutatása terén elért eredményeiért (**1. ábra**).

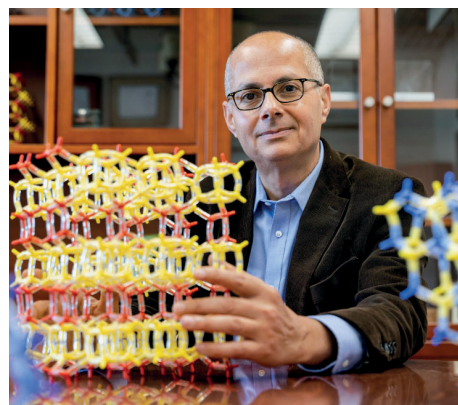
1. ábra. A 2025. évi kémiai Nobel-díj kitüntetettjei



Richard Robson



Susumu Kitagawa



Omar M. Yaghi

A díj egy új vegyületcsaládot és egy szintézisbeli paradigma-váltást tett világszerte ismertté. A Nobel-bizottság értékelése szerint a három kutató kulcsszerepet játszott az új anyagcsalád, a fémorganikus térhálós vegyületek (metal organic frameworks, rövidítve MOF-ok) létrehozásában és útra indításában. Robson az elméleti és korai kísérleti alapokat rakta le, Kitagawa a dinamikus és alkalmazható struktúrákat fedezte fel, felismerte porozitásuk jelentőségét. Yaghi a retikuláris tervezés úttörőjeként annak is tudatára ébredt, hogyan lehet a módszerrel nagy belső felülettel rendelkező anyagokat előállítani.

## Út a Nobel-díjig

Az angol származású Robert Robson Oxfordban doktorált, témája szerves molekulák fotokémiájának vizsgálata volt. Posztdoktori éveit a California Institute of Technologyon töltötte. Ezután került a University of Melbourne kötelékébe, ahol azóta is dolgozik.

A kiotói születésű Kitagawa szénhidrogén-kémiából doktorált szülővárosa egyetemén, önálló kutatásait a Kindai Universityn kezdte meg. Közben a Texas A&M University posztdoktora volt, és vendégprofesszorként dolgozott a City University of New Yorkon. Ezután a Tokyo Metropolitan University Szintetikus és Biológiai Kémia Tanszékén a szerves kémia professzora lett. Csaknem 20 éves kitérő után az Institute for Integrated Cell-Material Sciences társalapítójaként került vissza a Kyoto Universityre.

A Jordániában palesztin szülők gyermekeként született Omar Mwannes Yaghi 15 éves kora óta él az Egyesült Államokban. A University of Illinois-on doktorált. Az NSF ösztöndíjasaként a harvardi posztdoktori évek után az Arizona State Universityn, majd a University of Michiganon eltöltött professzori évek után érkezett a University of Californiára, először Los Angelesbe,

majd Berkeley-be. A MOF alkalmazására két kaliforniai székhelyű startupot is indított: 2020-ban a CO<sub>2</sub> és a légköri víz megkötése, a másodikat egy évvel később a hidrogéntárolás hasznosítására.

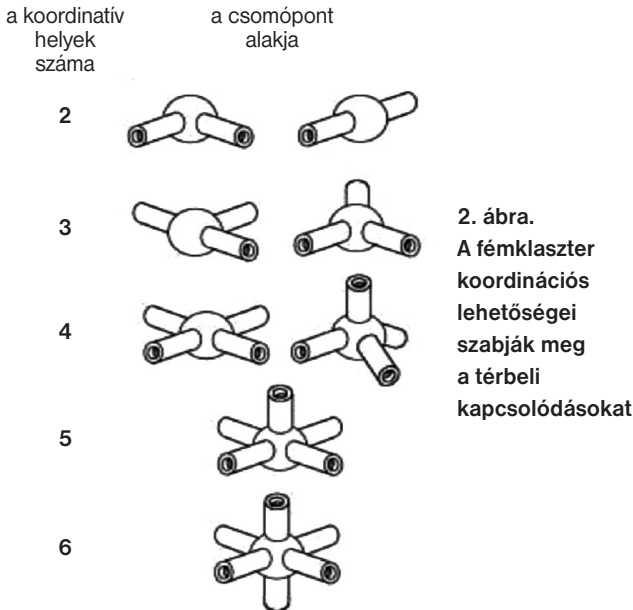
## A MOF-család

A modern anyagtudomány egyik legdinamikusabban fejlődő területe a fémorganikus vázak kutatása és fejlesztése. Mik is ezek a fémorganikus térhálók? Nevezhetnénk őket a szerves kémia közti hídnak is. A tulajdonságaik tervezhetőségéhez vezető újfajta, retikuláris megközelítés paradigmaváltást jelent a kémiai struktúrák kialakításában.

A fémorganikus térhálók vagy röviden – a magyarban is meghonosodott – MOF-ok fémionok vagy fémklaszterek (csomópontok) és szerves összekötők (linkerek) periodikus rendszeréből felépülő háromdimenziós térhálós kristályok, szűk, de összességében nagy térfogatú belső üregekkel, pórusokkal. A csomópontok tulajdonságai egyben megszabják a lehetséges elágazások számát és irányát, az őket összekötő szerves linkerek pedig szabályozzák a kialakuló pórusok méretét. Így a pórusok mérete, alakja és felületkémiái jellege tervezhető,

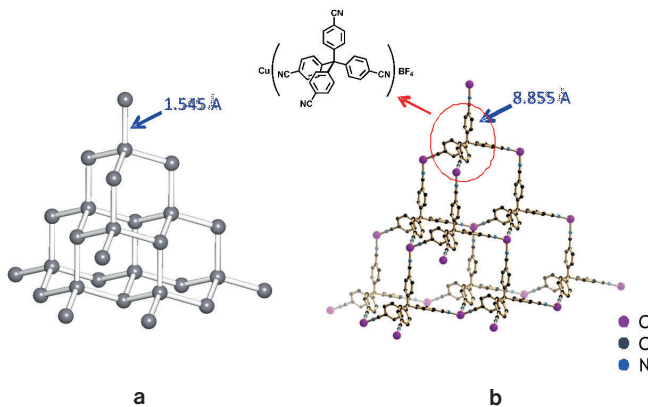
A periódusos rendszerben található szinte valamennyi fém vagy oxidja alkalmas a csomópont szerepének betöltésére. Koordinatív képességük alapvetően meghatározza a MOF szerkezetét (**2. ábra**). Leggyakoribbak a Cu-, Zn-, Ag-, Ni-, Zr-, Al-, Co-, Fe-, Cd-, Mo-tartalmú MOF-ok.

A hidak sokféleségét a szerves kémia többfunkciós aromás vegyületeinek széles tárháza biztosítja. A ligandumok leggyakrabban aromás karboxilátok vagy N-tartalmú vegyületek. Az aromás gyűrű a linkerek tartását, merevségét, a többi funkció az összekötő híd szerepét biztosítja. A láncot alkotó gyűrűk száma a pó-



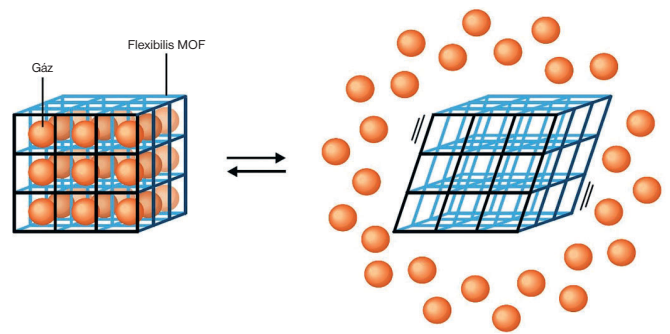
rusméretet, a kondenzált gyűrűk elsősorban a két fémklaszter közti kapcsolat merevségét befolyásolják.

A MOF-család születése akár a gyermekmondókára is emlékeztethet: ez elment vadászni... Robson volt az, aki a 80-as években a fém – szerves koordinációs polimerek (a MOF-ok elődjének) lehetséges formáit kezdte vizsgálni. Robson munkája indította el a gondolatot, hogy fémek és hosszú, többfunkciós organikus ligandumok önszerveződésével, rendszerszerű kombinációjával szabályozott, nagy kiterjedésű, „levegős” hálózatokat lehet építeni (3. ábra). Vegyületeinek stabilitása azonban nem volt kielégítő.

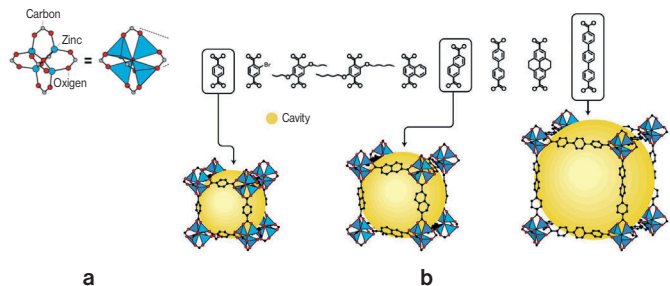


Kitagawa és munkatársai felismerték, hogy az ilyen típusú pórusos anyagok dinamikusan reagálhatnak a környezetükre (például a gáz nyomására) (4. ábra). Ez keltette fel érdeklődésüket és irányította kutatásaikat a MOF-ok alkalmazási lehetőségei felé. Kitagawa csoportja fedezte fel a „lélegző”, azaz a környezettel való kölcsönhatás során pórusméretet váltó MOF-ok csoportját is. Alapvető eredményeket értek el a szerkezet–funkció kapcsolatának részletes megismerésében és feltárásában.

Yaghi csoportja fejlesztette ki azokat a módszereket, amelyekkel óriási felületű és kontrollált pórusméretű, mindezen túlmenően kémiai is stabilis 3D vegyületeket lehet kialakítani. Ők állították elő az első stabilis MOF-okat. Ezt az a felismerés tette



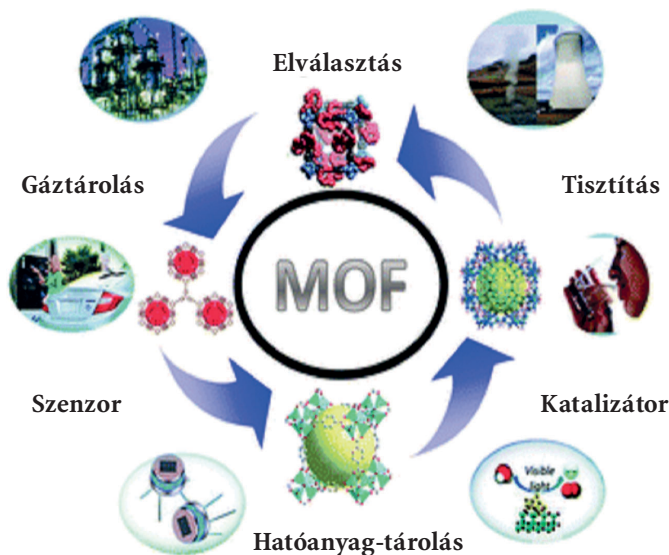
lehetővé, hogy a fém-oxidok (elsőként a Zn oxidja) stabilisabb csomópontok kialakítására képesek, mint a fémek önmagukban. Ezeket a fém-oxidokat nevezték el másodlagos szerkezeti egységnek (secondary building unit, SBU) (5.a ábra). A szerves ligandumok oldaláról elsősorban a karboxilcsoportok segítik a stabilitást. Megszületett az első stabilis MOF, a MOF-5 (az 5.b ábra bal oldali szerkezete). A Yaghi nevével összekapcsolódó paradigmaváltás annak felismerése, hogy a pórusszerkezet és a kémiai tulajdonságok tudatos megválasztásával tervezetten hozhatók létre célzott feladatra szolgáló 3D rendszerek. Ezt az eljárást retikuláris kémiának nevezik. (Az 5.b ábrán látható nagy sárga gömbök a pórusok térfogatát jelzik.)



A MOF-okat leginkább fantázianeveükről ismerjük, melyek gyakran a kutatóhely nevéből képzett rövidítések. A MOF-családnak ma már külön website-ja van (<https://mof-international.org>) és jelenleg 12 000 kristályos tagját tartja nyilván a Cambridge Structural Database (<https://www.ccdc.cam.ac.uk/free-products/csd-mof-collection/>).

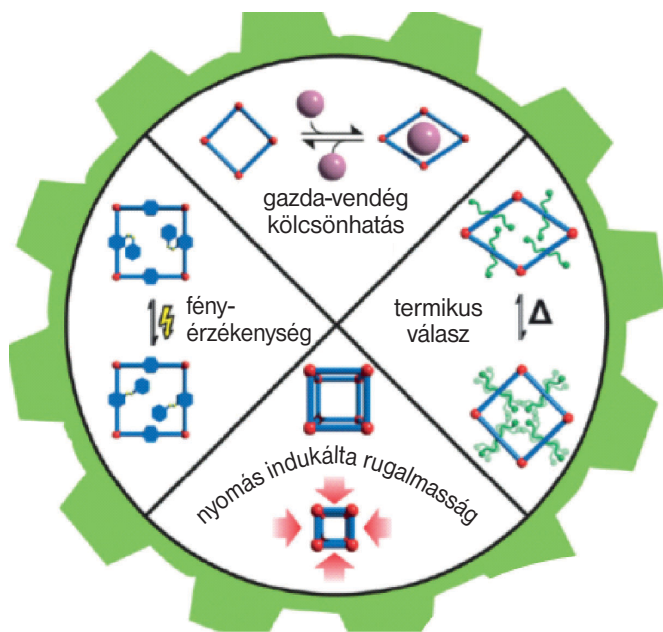
**Alkalmazási lehetőségek**

A MOF-ok hangolt méretű pórusokkal és hangolt energiájú kötőhelyekkel rendelkező, nagy szorpciós kapacitású 3D kristályos szerkezetek. Halmazállapotuk szilárd. A MOF-ok alkalmazási területeit, mint minden új anyagét, igen széles körben tesztelik (6. ábra). Nem meglepő módon ezek a nagy felületet, a pórusok hangolható méretét, a fémklaszterrel, a ligandummal vagy ezek módosításával bevíhető kémiai tulajdonságot hasznosítják.



6. ábra. A MOF-ok eddig ismert alkalmazási lehetőségei

Az alkalmazások egy része a MOF-ok tulajdonságainak környezeti inger hatására történő reverzibilis megváltozásán, rezonivitásán alapul. Ingerként szolgálhat a hőmérséklet, a nyomás, a fény vagy akár egy megfelelő méretű kismolekula (7. ábra). Környezeti hatásra változhat a pórusok alakja, térfogata („lélegző” MOF-ok).



7. ábra. A környezeti ingerekre reagáló, ún. rezponzív MOF-ok típusai

A MOF-ok legfontosabb jellemzője a retikuláris kémia szerint tervezhető fajlagos felület. Hogyan lehet egy fal nélküli pórus felületét értelmezni? A pórusokhoz rendelt felületek látszólagosak. A pórusokba betölthető gáz mennyiségét ismerve adhatjuk meg ezt a névleges felületet: ekkora felület kellene ugyanennyi gáz síkban történő elhelyezéséhez, azaz ha a gázmolekulákat szorosan egymás mellett, egy rétegben szeretnénk elhelyezni egy felületen. Egy grammnyi MOF névleges felülete egy futballpálya felületének nagyságát is elérheti. Szintetizáltak már 7800 m<sup>2</sup>/g látszólagos fajlagos felületű fémorganikus térhálót is.

A névleges felület jellemzi a MOF gázmegkötő képességét. Ezt szemléltethetjük a kristályszerkezetbe nem kovalens, másodlagos kölcsönhatás révén megkötődő gáztérfogattal, az ún. van der Waals-üreg térfogatával. A gázmolekulák rendelkezésére álló teret szimbolizáló nagy sárga gömbök az 5.b ábrán szemléletesen illusztrálják, hogyan változik ez a térfogat a szerves hidak méretével. A ligandumok mérete és a fémklaszterek térszerkezete szabályozza a pórusok méretét: mekkora molekulákat képesek befogadni egyáltalán és azokat milyen kötési energiával, milyen szorosan tudják magukban tartani.

Jelenleg a legígéretesebb alkalmazások, amint erre Yaghi start-up cégeinek profiljából is következtethetünk, a porozitást hasznosító gáztárolás és gázválasztás területén látszanak. A jelenleg a kolloidikából jól ismert: a molekulák méretével összevethető méretű üregekben (pórusokban) a gázok/gőzök a forráspontjuknál alacsonyabb hőmérsékleten is megkötődnek és folyadékká alakulhatnak. Ez jelentős térfogatcsökkenéssel jár, azaz a pórusokban így sokkal több anyag tárolható, nyelethető el. A pórusok ezután a nyomás csökkentésével vagy a hőmérséklet növelésével kiüríthetők, ismét tárolásra foghatók.

### Szén-dioxid megkötése

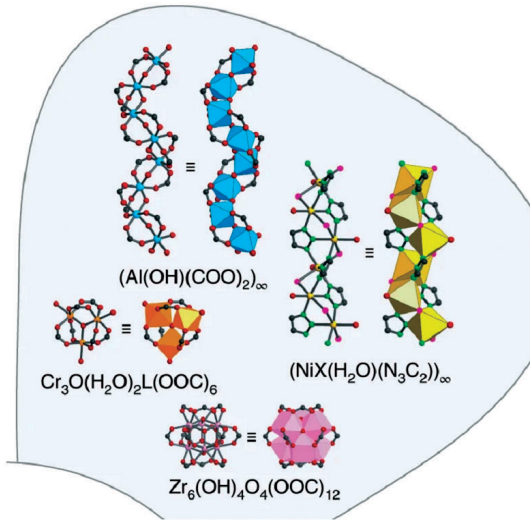
A MOF-ok képesek szelektív módon megkötöni a levegőből vagy más gázelegyből a CO<sub>2</sub>-t. A pórusok méretének és felületének optimalizálásával növelhető a megkötési kapacitás és szelektivitás. A MOF-ok alkalmazása esetén az eljárás energiaigénye lényegesen alacsonyabb, mint a hagyományos, folyadékban történő elnyelésen alapuló eljárásoké.

### H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> tárolása

Az energiaforrásként használható gázok (H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>) szorpciós elvű, például a MOF pórusaiban megvalósítható tárolása és szállítása biztonságos és energiatakarékos alternatívát kínál a nagy nyomású és a cseppfolyósított gáz tárolásával szemben. Sikertült már olyan MOF-okat szintetizálni, amelyek alkalmazásával a jelenlegi üzemanyagtankokkal azonos térfogatban annyi metánt lehet adszorpciós úton megkötöni, amennyivel egy könnyebb jármű, például személygépkocsi az elektromos meghajtású járművek hatótávolságához hasonló utat képes megtenni.

### Víz megkötése levegőből

A metán vagy hidrogén tárolásánál nagyobb kihívást jelentett a levegőből légköri nyomáson vizet kinyerni képes MOF-ok kialakítása. Ennek komoly szerepe lehet a csapadékszegény vidékek vízellátásában. A MOF előállítása során a fémklaszter – szerves ligandum kapcsolatok önszerveződés révén alakulnak ki. Kémiai természetük miatt az ilyen kötések döntő többsége vízérzékeny, már a levegő páratartalmának hatására is megindul egy lassú hidrolízis, ami a MOF szerkezetének fokozatos degradációját és így az alkalmazás során elvárt teljesítményének, például a gáztároló kapacitásának elvesztését eredményezi. A 8. ábrán látható fémklaszterekkel sikerült vízmegkötésre alkalmas, hidrolízis-ellenálló fémorganikus térhálókat szintetizálni. Ezek a MOF-ok alkalmasak a levegő páratartalmának megkötésére. Ennek hatékonyságához a sivatagok jól ismert éjszakai lehűlése, az alacsonyabb hőmérséklet természetes segítséget nyújt.



8. ábra. A levegő páratartalmának ellenálló fémklaszterek

### Hogyan tovább?

A ma még megoldatlan technikai nehézségek további vizsgálatokat igényelnek és inspiráló kihívást jelenthetnek a kutatók-

nak és a technológusoknak. A fémorganikus térhálókból rejlő lehetőségek kiaknázását jelenleg több tényező is nehezíti. Néhány kivételtől eltekintve a laboratóriumi szintézis eljárásokat nem sikerült ipari méretűvé növelni. A már említett külső környezetre, elsősorban a páratartalomra való érzékenység nemcsak a felhasználás, hanem már a tárolás során is nehézséget jelent. A MOF-ok a szerves ligandumok miatt hőmérséklet-érzékenyek és egyben rossz hővezető képességűek. Ez a gáztárolási alkalmazásban komoly nehézséget jelent, hiszen a feltöltés során felmelegednek. Az el nem vezetett hő nemcsak biztonsági szempontból veszélyes, de jelentősen csökkentheti a megkötött gáz mennyiségét. A gáz felhasználásakor a rendszer lehűl, a pórusokban megkötött gáz nem nyerhető ki teljes mértékben fűtéssel. Jó hővezetésű anyagokkal történő társítás jelenthet erre megoldást.

### A fémorganikus térháló kutatása Magyarországon

Hazánkban a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontban, a Szegedi Tudományegyetemen és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen folytak vagy folynak jelenleg is fémorganikus térhálókkal kapcsolatos kutatások.

Duda Ernő

Fiziológiai és orvostudományi Nobel díj – 2025

# Szabályozó immunsejtek – perifériás tolerancia

**A**z immunrendszer közismert feladata a veszedelmes kórokozók (vírusok, baktériumok, egysejtűek, gombák stb.) elleni védelem. Legalább ennyire fontos, de kevésbé köztudott, hogy olyan immunsejtjeink is vannak, amelyek feladata a „veszélyes saját” sejtek elpusztítása. Ha egy sejtben felszaporodnak a mutációk, tumoros elfajulásra esik át vagy kórokozók szaporodnak benne, az egész szervezetre veszélyt jelent. Az ilyen „saját” sejtek ellen védenek bennünket a T sejtek egyes változatai (de ezek játszanak szerepet az átültetett szervek kilökődésében is).

A T sejtek azok az immunsejtek, amelyek nem a csontvelőben, hanem a csecsemőmirigyben (timusz) fejlődnek ki. Ma már nagyon sokféle T sejtet ismerünk, amelyek eltérő feladatokat látnak el, ennek megfelelően más- és másféle fehérjéket termelnek, más- és másféle gének működnek bennük. Ezen az alapon lehet megkülönböztetni őket: a CD4 fehérjét termelők CD4+, az azt nem termelők CD4– T sejtek.

Gyakran csak utóbb tudjuk meg, hogy az egyes fehérjék milyen feladattal bírnak, mire képesek az illető fehérjét termelő sejtek. A japán immunológus Szakagucsi Simon immunhiányos egerekkel kísérletezett. Ezekben az állatokban hiányoznak a T sejtek, ezért nem tudnak védekezni a vírusokkal vagy a sejtekben szaporodó baktériumokkal vagy tumorokkal szemben. Ezek kitűnő állapotmodelljei az emberekben előforduló, szerencsére ritka, örökletes betegségnek, a súlyos, kombinált immunhiányos betegségnek (SCID).

Amikor Szakagucsi bejuttatta az egészséges állatokból származó CD4+ T sejteket ezekbe az állatokba, helyreállította az állatok védekezőképességét, gyógyította az immunhiányos állapotot. A T sejtek szaporodásában fontos szerepet játszik az IL-2 nevű növekedési faktor, de a CD4+ sejteknek csak egy kis része hordozza a CD25 fehérjét, ami ennek a faktornak a hatását közvetíti (receptor). Szakagucsi eltávolította a CD25+ sejteket a T sejtek közül, és csak a fehérjét *nem hordozó* sejteket juttatta be az állatokba. Drasztikus meglepetés érte: a gyógyítónak hitt sejtek szörnyű autoimmun betegségekre utaló tüneteket okoztak az állatokban. A CD25+ sejtek bejuttatása viszont azonnal véget vetett a betegségnek.

Az immunrendszer különböző sejt típusai, válaszaik gyakran gátolják egymás működését, ezért korábban is voltak, akik feltételezték, hogy vannak olyan sejtek, amelyek feladata az immunválasz fékezése, gátlása. De senki nem tudta korábban bizonyítani ilyen sejtek létezését. Tehát a CD4+CD25+ sejtek felfedezése mérföldkőnek számított a „veszélytelen saját” sejtek elleni immunválasz megakadályozásának – a „perifériális toleranciának” – a fenntartása szempontjából.

A különféle szőrszínű egerek hobbi tenyésztése évszázadok óta folyt, ezt később tudományos igénnyel folytatták genetikailag eltérő, beltenyésztett törzsek előállítására. Az egyik ilyen vonal, amit a múlt század ötvenes éveiben fedeztek fel, a *scurfy* (korpás)