

ATOMENERGIA KUTATÁSOK HELYZETE ÉS PERSPEKTÍVÁI*

Röviden az energiáról

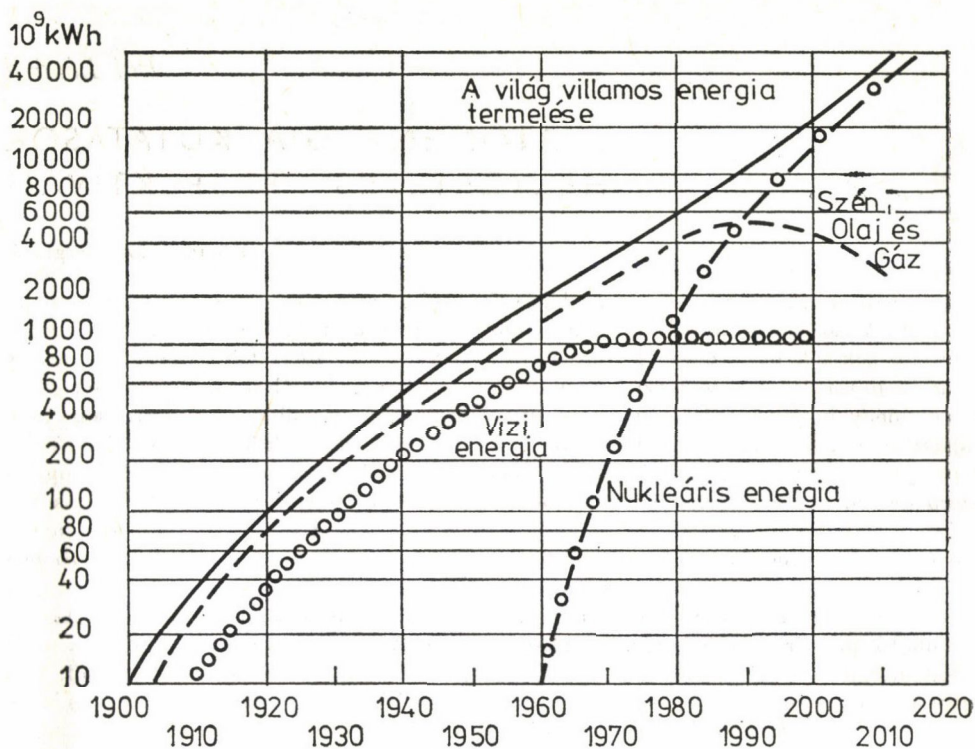
Közeledünk a harmadik évezred felé, és Földünkön minden egyre gyorsabb tempóban változik. A változások mai forgatagában azonban gyakran megfeledkezünk arról, hogy a múltban sok-sok évszázadon keresztül — a XX. század mértékével mérve — szinte semmi sem történt. Mintegy száz évvel ezelőtt azonban az idő álmos hőmpölygését jelentős események egész sora zavarta meg, amelyek hatására a fejlődés korábban soha nem tapasztalt módon felgyorsult. Ezek között a jelentős események között kiemelkedő szerepet játszott az anyagi javak termelésében felhasznált energia mennyiségének ugrásszerű megnövekedése, amit a hőenergia mechanikai munkává való átalakításának felfedezése tett lehetővé. A 40 watt teljesítmény kifejtésére képes emberi izomerőt a hőerőgépek teljesítménye sokszorosan felülmúlta, és ez a körülmény fontos tényező lett az ipari forradalom kibontakozásában.

Figyelemre méltó, hogy az emberiség 1870-ig lényegében csak a természet által regenerálható, primér energiaforrásokat hasznosította. A Föld vizeinek és légkörének mozgásában rejlő energia mellett a Nap energiáját fotoszintézissel konvertáló erdők fája adta az emberiségnek az 1800-as évek első felében a legtöbb energiát. Az előrelátás indokolt vagy indokolatlan hiánya miatt óriási területekről tűntek el az erdők, és változott meg nagy kiterjedésű vidékek biológiai, éghajlati egyensúlya. A huszadik század elején a primér energiaforrások közt a kőszén vette át a vezető szerepet, amely azonban már nem tekinthető regenerálható energiahordozónak. Az emberiség által évenként termelt energiához 1910 körül már a kőszénből előállított energia adta a maximális hozzájárulást.

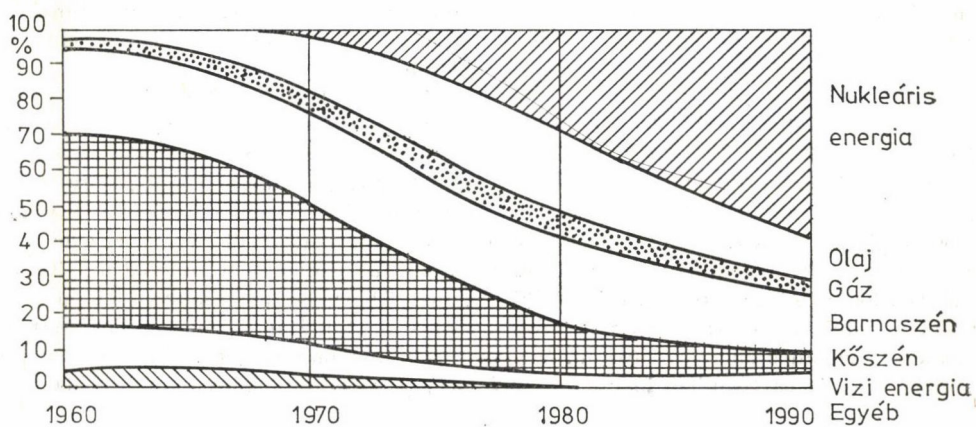
Döntő fordulatot jelentett az energia-felhasználás fejlődésében a század elején fellendülő villamosenergia-termelés, amely rohamos tempóban növekedett, és a felhasználásra kerülő primér energiaforrások összetételében is jelentős átalakulást indított. A vízi energia, a kőszén és barnaszén mellett megjelent az olaj és a gáz. E két utóbbinak a részesedése a 60-as évek második felétől kezdve nagy sebességgel nőtt, míg elő nem állt a világszerte nagy megrázkódtatást okozó „energiaválság”.

Közismert, hogy a villamos energia az emberiség eddigi legfontosabb és leggazdaságosabb energiahordozója. A világ energia-felhasználásában a villamos energia részesedése 1950 és 1971 között 16%-ról 20%-ra nőtt. Míg 1950-ben 965 milliárd kWó-t, addig 1970-ben már mintegy 5000 milliárd kWó-t termelt a világ, ami azt jelenti, hogy évenként csaknem 9%-kal nőtt a termelés. Ebben az időszakban jelentősen módosult a villamosenergia-termelés szerkezete is. Nőtt a hőerőművekben termelt villamos energia aránya a vízi erőművekben előállított energia rovására. Megváltozott a hőerőművekben felhasznált tüzelőanyag összetétele is. 1950 és 1970 között 75%-ról 65%-ra csökkent a széntüzelésű hőerőművekben termelt energia aránya, és nőtt az olaj- és gáztüzelésű erőművekben előállított villamos energia hányada. Megjelentek a maghasadás energiáját hasznosító atomerőművek, és 1970-ben már mintegy 2–3%-os részarányt képviseltek a villamos-

* A tudományos ülészakon elhangzott előadás rövidített változata. A teljes előadás a **Fizikai Szemle** c. folyóiratban jelenik meg.



1. ábra. A világ villamosenergia-termelésének tüzelőanyagok szerinti megoszlása az idő függvényében



2. ábra. A Német Szövetségi Köztársaság villamosenergia-termelésének tüzelőanyagok szerinti megoszlása az idő függvényében

energia-termelésben. Érdemes ezt a szerkezeti átalakulást nyomon követni, és megvizsgálni, hogy mit várhatunk a jövőben. Az 1. sz. ábra a világ villamosenergia-termelésének tüzelőanyagok szerinti megoszlását mutatja az idő függvényében. Látható, hogy a prognózis szerint a nukleáris tüzelőanyagra alapozott villamosenergia-termelés 1990-ben a teljes termelés 50%-át fogja adni. Ugyanezt a szerkezeti változást szemlélteti a 2. sz. ábra a Német Szövetségi Köztársaság villamosenergia-iparában. Itt is figyelemre méltó a nukleáris bázisú energiatermelés gyors növekedési üteme. Lehetséges, hogy ezeken az ábrákon máris kisebb-nagyobb változtatásokat kellene eszközölni, azt a konklúziót azonban el kell fogadnunk, hogy századunk utolsó negyedében a nukleáris fűtőanyagra alapozott energiatermelés az összenergia-termelésen belül meghatározóvá válik.

Bátran állíthatjuk tehát, hogy 1950 és 1960 között az energiatermelésben új korszak kezdődött, amelynek hajnalát azonban a túlfűtött optimizmus kezdetben az indokoltnál rózsaszínűbbre festette, és így a később feléledő borulástát mind a mai napig csak nehezen és nem is mindenütt lehetett eloszlítani. Amikor 1955-ben Genfben az Egyesült Nemzetek égisze alatt összeült az első nemzetközi konferencia az atomenergia békés célokra történő hasznosításának előmozdítására, akkor szinte minden országban — fejlettekben és fejletlenekben egyaránt — nagy remények ébredtek. A remények valóra váltását korábban részben gazdasági, újabban pedig egyes kapitalista országokban politikai tényezők korlátozták.

Ismeretes, hogy 1950-től egészen 1973-ig az olaj világpiaci ára állandóan csökkent. Ennek hatására az a vélemény alakult ki, hogy az olajtüzelésű erőművekben termelt villamos energia hosszú időn át olcsóbb lesz, mint az atomenergia. A világon mindenütt egyre-másra építették az olajra alapozott villamos erőműveket. Az atomerőművek létesítésének tempója pedig a korábban elképzelt ütemhez képest lelassult. Sajnos az olajárakra vonatkozó prognózistlan figyelmen kívül hagyták azt a fontos tényezőt, hogy ha az olajkitermelés növekedésének sebessége továbbra is az 1970 előtti két évtized tempójának megfelelően fokozódik, akkor 1995 körül a kitermelésben éles visszaesés várható, a feltárt és a gazdaságosan feltárható készletek gyors kimerülése miatt. Az olajtermelő monopóliumok 1973-ban, felismervén az ebből a helyzetből adódó következményeket és profitszerzési lehetőségeket, gazdasági érdekeikből kiindulva, az árak drasztikus felemelésével igyekeztek befolyásolni a felhasználás ütemét, és növelni jövedelmüket.

Az új helyzetben így ismét napirendre került az energiatermelés és felhasználás korszerűsítésének kérdése és ezen belül a maghasadás energiáját hasznosító atomerőművek létesítésének meggyorsítása. Időközben azonban a közvélemény figyelmét — különösen egyes fejlett iparral rendelkező országokban — lekötötték azok a megalapozott aggodalmak, amelyeket az ember természeti környezetének káros megváltozása: a vizek, a levegő szennyeződésének növekedése váltott ki, és néhány tőkés országban jelentős ellenállás bontakozott ki az atomerőművek építése ellen. A különféle eszközökkel manipulált közvélemény és bizonyos reális aggodalmak hatására a tudomány emberei közül is számosan írtak olyan cikkeket, amelyekben nemcsak az atomerőművekben termelődő radióaktív hulladékoktól, a várható termikus szennyeződéstől, hanem magától az energiatermelés további fokozásától is óvni kezdték az emberiséget. Ilyen légkörben láttak napvilágot olyan „tudományosnak” tűnő írások is, amelyek az energiatermelés korlátozását, és ennek következményeként a gazdasági fejlődés befagyaszthatását propagálták. Ezen az úton azonban nem járhat az emberiség.

Az emberek életkörülményeinek javításához szükséges feltételek megteremtésében az egy főre jutó energiatermelés növekedésének meghatározó szerepe van. Az egyre fokozódó szükségletek kielégítésére szolgáló anyagi javak előállításához mind az iparnak, mind a mezőgazdaságnak egyre több energiára van szüksége. Növekszik az energia szükséglete a bányászatnak, mivel egyre inkább elkerülhetetlen az olyan ásványkincsek fel-

tárása és felhasználása, amelyekben az értékes összetevők koncentrációja alacsony. Sok energiát emészt a meg nem újuló alapanyagok regenerációja; és nem kevés az energia-szükséglete a hatékony környezetvédelemnek sem. A modern közlekedés, szállítás, hírközlés, a lakások fűtése is rengeteg energiát igényel. Figyelemre méltó az is, hogy az iparszerű, nagy termelékenységű mezőgazdasági nagyüzem ma már alig használ el kevesebb energiát, mint a hagyományos ipari tevékenységet folytató gyár. Számításokat végeztek, hogy élelmiszereinkben egy kalória energiataralom létrehozásához hány kalória energiára van szükség, és kiderült, hogy egyre növekedő energiafelhasználással kell számolni.

Nyilvánvaló, hogy az atomerőművek bizonyos potenciális veszélyei miatt, amelyek azonban sokkal kisebbek annál, mint ami a közvéleményben elterjedt, nem kárhoztatható az emberiség globális stagnálására. Nincs más lehetőség, mint fokozatosan áttérni a nukleáris bázisú energiaforrások alkalmazására a még gazdaságosan üzemeltethető, fosszilis fűtőanyaggal működő energiatermelő berendezések egyidejű továbbfejlesztése mellett.

A nukleáris energia hasznosítása békés célokra részben a maghasadás, részben pedig a magfúzió révén valósítható meg. Míg a maghasadás energiáját 1954 óta erőművekben egyre olcsóbban és biztonságosabban használja fel az emberiség, addig a magfúzióban felszabaduló energiát — ipari méretekben — előreláthatóan csak az ezredforduló körül veheti birtokába.

Érdemes megemlíteni, hogy az energiafelhasználás általában akkor gazdaságos, ha az igénybe vehető energiafluxus nagy. Ez azt jelenti, hogy az olyan energiatermelő berendezések, amelyek viszonylag kis energiafluxus előállítására alkalmasak (pl. napelemekből felépített energiaforrások) csak erősen korlátozott felhasználásra számíthatnak. Ezért a nukleáris energiatermelő berendezéseket aligha pótolják majd pl. a napenergiát hasznosító berendezések. Talán a geotermikus energiát lehet majd a Föld egyes részein gazdaságosan felhasználni.

Ma a fejlett iparral rendelkező országok nagy gondot fordítanak az energiatermelés és felhasználás fejlesztésére, új energiatermelő eljárások és racionális, energiatakarékos felhasználási módszerek kidolgozására. Szemléltetésül szeretném bemutatni az energia-kutatási és fejlesztési költségek alakulását 1975 és 1977 között az Amerikai Egyesült Államokban. Az 1. sz. táblázatból látható, hogy 1977-ben a legnagyobb összegeket a maghasadásra alapozott energiatermelés fejlesztésére fordítják, ezt követik a fosszilis

1. táblázat

*Az energiatermelés kutatási és fejlesztési költségei az Egyesült Államokban
1975 és 1977 között (millió \$-ban)*

	1975	1976	1977
Fosszilis	175,6	403,5	523,7
Szoláris	14,9	86,0	116,0
Geotermális	31,3	41,8	55,7
Hasadásos	388,5	590,0	789,3
Fúziós	151,2	223,0	304,5
Nukleáris üzemanyag ciklus	126,3	176,0	305,8
Tárolás	22,2	62,6	97,9
Környezet ellenőrzés	25,4	88,8	91,8
Környezetvédelem	193,7	301,5	326,6
Alapkutatás	219,8	249,5	292,0
Egyéb támogatás	24,8	35,0	36,0

energiahordozókra, majd a magfúzióra alapozott energiatermeléssel kapcsolatos kutatási és fejlesztési kiadások. A nemzetközi helyzet ismeretében azt mondhatjuk, hogy a fejlett iparral rendelkező országokban általában ez a sorrend, míg a közepesen fejlett országokban a nukleáris energetika fejlesztésére viszonylag kevesebbet áldoznak, mint a klasszikus energetika fejlesztésére, azonban ezekben az országokban is nő a nukleáris energetika súlya és jelentősége.

Kutatási és fejlesztési feladatok a maghasadáson alapuló energiatermelésben

Aligha kell hangsúlyoznom, hogy a maghasadáson alapuló energiatermelés kutatási és fejlesztési fő feladatának mindenütt a meghibásodás-mentes, gazdaságos és biztonságos üzemvitel elérését tekintik. Ez a fő feladat a termikus reaktorok esetében, és erre irányulnak az erőfeszítések a gyors reaktorok fejlesztésében is. Ennek érdekében tökéletesítik az üzemanyagot tartalmazó fűtőelemeket, javítják az alkalmazott szerkezeti anyagok tulajdonságait, kutatják az energiaátalakítás hatásfokát növelő eljárásokat, fejlesztik az esetleges meghibásodások korai felismerésére szolgáló módszereket.

A fő feladat megoldásában természetesen meghatározó szerepet játszik az üzemanyag-technológia. Minden maghasadáson alapuló energiatermelő berendezés primér üzemanyaga az urán 235-ös izotópja, amely vagy a természetben előforduló koncentrációban, vagy ahhoz képest dúsítottan kerül felhasználásra. A szekunder üzemanyagok között kiemelkedő jelentőségű a reaktorokban termelődő plutónium, és feltehetően fontos lesz a tóriumból előállítható urán-233. A nukleáris energetika jövője erősen függ attól, hogy az üzemanyag előállításának, felhasználásának és újrafeldolgozásának összefüggő láncolata, az úgynevezett üzemanyag-ciklus milyen formában valósul meg. Nem véletlen, hogy az 1977 májusában Salzburgban megtartott nemzetközi konferencián is ez a kérdés volt a figyelem középpontjában. Természetesen elsősorban nem a technológiai finomságok kötötték le a résztvevők érdeklődését — hiszen nyugodtan állíthatjuk, hogy az üzemanyag-ciklus technológiai problémái lényegében megoldottak —, hanem azok a gazdasági, társadalmi, politikai konzekvenciák, amelyek az üzemanyag-ciklus realizálására szolgáló telepek létrehozásával kapcsolatban merülnek fel. Úgy tűnik, hogy ezen telepek nagy beruházási költségei, potenciális veszélyei fokozott nemzetközi együttműködés és hatékony ellenőrzés megvalósítását teszik szükségessé. Ugyanakkor kiderült, hogy politikai motivációk, de talán üzleti érdekek miatt is ellentétes nézetek alakultak ki az USA és más országok között ilyen telepek létesítésével kapcsolatban. Nincs szándékomban a dúsító és reprocesszáló telepek igen bonyolult kérdéseit most vizsgálat tárgyává tenni, csupán annyit szeretnék megjegyezni, hogy ezen telepek sorsa alapvetően befolyásolhatja a nukleáris energetika egész távlati fejlődését.

Mivel a világon mindenütt a könnyűvízes energetikai reaktorok kerültek előtérbe, indokoltnak látszik, hogy a következőkben csak az ezekkel kapcsolatos néhány kutatási és fejlesztési feladatról tegyek említést. A fejlesztés követelményei egyszerűen összefoglalhatók:

- az egységnyi teljesítményre eső beruházási költségek csökkentése;
- a létesítési idő lerövidítése;
- az egységnyi energiamennyiség (pl. 1 kWó) előállítási költségének csökkentése;
- a természeti környezet mindenféle elszennyeződésének megakadályozása.

Természetesen ezek a követelmények bármilyen energiatermelő berendezéssel kapcsolatban megfogalmazhatók, azonban a teljesülésükhöz vezető utak különböző berendezések esetében már eltérőek lehetnek. A beruházási költségek csökkentésében például nagy szerepet játszhat a szerkezetek szabványosítása, és a modulrendszerű konstrukció

megvalósítása, mert ez esetben a részegységek gyártása nagyobb sorozatban és olcsóbban valósítható meg. A szabványosított elemekre épülő konstrukció nyilván a létesítési időt is lerövidítheti. Megnövelheti azonban a beruházási költségeket a reaktor aktív zónájának egységnyi térfogatára eső teljesítmény erőteljes felemelése; a fűtőelemkiégetés fokának és egyenletességének növelése; az üzembiztonság fokozása; az üzemeltetéshez felhasznált élmunka csökkentése; a természeti környezet védelme stb. Ezek a célkitűzések többségükben ugyanakkor olyanok, hogy megvalósításuk kedvezően befolyásolja az energiatermelés költségeinek alakulását. A gazdaságosság fokozása sokrétű és bonyolult kölcsönhatások vizsgálata alapján tervezhető, és nem lehet kétséges, hogy a kutató, fejlesztő munkának a jelen időszakban egyértelműen az a feladata, hogy az atomerőművek gazdaságosságát növelje.

Annak következtében, hogy a Földön előforduló természetes hasadó anyag- (urán-235) készlet erősen korlátozott, és ezért újatermelés nélkül hamarosan kimerül, a maghasadás energiáját hasznosító energiatermelő berendezések gazdaságosságát hosszú távon csak olyan komplex rendszer biztosíthatja, amelyben a szaporító, gyors reaktorok a hasadó anyag megsokszorozását lehetővé teszik. Szerte a világon intenzív munka folyik a gyors reaktorok fejlesztése érdekében, és minden bizonnyal megvalósítható lesz ez a komplex rendszer.

A technikai lehetőség azonban önmagában nem elégséges. Jól ismertek azok a vélemények, amelyek a gyors reaktorok és reprocesszáló üzemek potenciális veszélyei miatt az ilyen energiatermelő rendszerek megvalósítását ellenzik, és különösen a szétszórt telepítésüket megengedhetetlennek tartják. Ezeknek a véleményeknek van némi alapjuk, azonban ha nem volna más kiút az emberiség növekvő, bár valószínű telítődő energiaszükségleteinek kielégítésére, mint a maghasadásra alapozott energetika, akkor nyilván ennek maximálisan biztonságos és ezért feltehetően költséges megvalósítására kellene koncentrálni az erőket.

Úgy tűnik azonban, hogy lehetséges egy másik, sokkal kedvezőbb út, amely az évezred végére elvezet egy új energetika, a magfúzió energiáját hasznosító energetika megszületéséhez. Erről az útról most csak annyit jegyzek meg, hogy a magfúzióra alapozott energiatermelés ígérete nem jelentheti azt, hogy ne fejlesszük az energetikai gyors reaktorokat, és ne tökéletesítsük a már használatos könnyűvízes reaktorokat. A helyes stratégia nyilván az, ha a kutató és fejlesztő tevékenység egyrészt a már elterjedt termikus reaktorok gazdaságosabb megépítését és üzemeltetését segíti elő, másrészt a gyors reaktorok biztonságos energia- és hasadóanyag-termelésre való alkalmassá tételét szolgálja.

Hazánk ebből a nagy programból csak kis területen vállalhat részt, és ennek a területnek is szoros kapcsolatban kell lennie a nálunk létesülő atomerőművek továbbfejlesztését szolgáló nemzetközi kutatási programmal, amely a Szovjetunió kezdeményezésére a KGST Atomenergia Állandó Bizottságának hatékony támogatásával jött létre. Ha rövid pillantást vetünk a II. sz. táblázatra, amely a hazai energiaszükséglet várható alakulását és abban az atomenergia szerepének növekedését mutatja, észrevehetjük, hogy 1990-ben a hazai erőműrendszer összteljesítményének 28%-át, 2000-ben pedig mintegy 50%-át az atomerőművek fogják adni. Ez azt jelenti, hogy a következő 20–25 év alatt a hazai energiaipar jellege gyökeresen megváltozik, és ezt a változást csakis a nemzetközi munkamegosztásra, elsősorban a Szovjetunióval kiépített tudományos, műszaki és ipari együttműködésre alapozva tudjuk végrehajtani. Ezért nyilvánvaló, hogy a hazai kutató, fejlesztő munkát, továbbá az ipari együttműködést ennek a célnak a szolgálatába kell állítanunk.

A hazai kutatási tevékenységnek tehát egyrészt biztosítania kell a megfelelő hátteret a magyar atomenergia-ipar tervezett ütemű fejlesztéséhez főként a szakemberképzésben, valamint az üzemeltetés gazdaságosságát befolyásoló tényezők feltárásában és kedvező

2. táblázat

Az energiaigények alakulása hazánkban 1950 és 2000 között

	1950	1975	1980	1990	2000
Évi összes energiafelhasználás 10^{12} kcal egységekben	63,5	260,0	323,0	473,0	660,0
Az évi összes felhasználásból a villamos energia hányada százalékban	21,1	29,6	33,0	43,0	58,0
Évi villamos energia igény 10^6 MWh egységekben	3,1	24,6	35,0	70,0	135,0
Az erőműrendszer kapacitása MW(e)-okban	690	4 450	5 980	13 000	26 000
Az erőműrendszer teljesítményének százalékos megoszlása a tüzelőanyagok szerint					
széntüzelésű	98,9	52,0	37,6	38,0	31,5
szénhidrogén-tüzelésű		42,6	50,8	25,0	13,0
nukleáris			7,3	28,0	48,0
egyéb	1,1	5,4	4,3	9,0	7,5

irányú megváltoztatásában; másrészt hozzá kell járulnia a szocialista országok közös távlati fejlesztési elképzeléseinek valórváltásához.

Ezt a célkitűzést szolgálja a Magyar Tudományos Akadémiának az a döntése, amely az intézeteiben folyó atomenergia kutatásokat 1976-ban tárcaszintű kutatási főiránnyá nyilvánította. A főirány kutatási programja megfelel a reális szükségleteknek és összhangban van a hazai lehetőségekkel, támaszkodik az eddig elért eredményekre és a nemzetközi munkamegosztás lehetőségeire. Érdemes idézni a főirány legfontosabb kutatási feladatait:

- energetikai reaktorok tervezése és üzemeltetése szempontjából fontos magfizikai adatok (hatáskeresztmetszetek, bomlási állandók, rezonancia paraméterek stb.) meghatározása, kiértékelése;
- magfizikai detektálási technikák továbbfejlesztése, tekintettel az atomenergetikai alkalmazásokra, amilyenek például a kiégésvizsgálat, nukleáris biztonság, sugárvédelem, anyagvizsgálat stb.;
- nyomottvizes atomerőművek optimális és biztonságos üzemvitelének megalapozására szolgáló, kísérletileg ellenőrzött számítási apparátus kidolgozása a legújabb nukleáris adatok alapján;
- statikus és tranziens hőátadási és áramlási (röviden termohidraulikai) folyamatok vizsgálata a nyomottvizes atomerőművek zónáiban a hőenergia optimális hasznosítása érdekében és az üzemzavar állapotok előrejelzése és lokalizációja céljából;
- a reaktorzóna dinamikus magtartásának vizsgálata üzemzavari állapotokban, az üzemzavari helyzetek detektálására szolgáló módszerek elméleti és kísérleti kutatása, az ún. erőművi reaktordiagnosztika megalapozása;

- a személyi sugárterhelést megszabó tényezők vizsgálata, a környezetbe kikerülő radioaktív izotópok élettelen és élő közegekben való terjedésének kutatása; érzékeny, szelektív mérési módszerek kidolgozása az élő szervezetek sugárterhelésének ellenőrzésére;
- atomerőművek számítógépes irányító rendszerének kifejlesztése nagy megbízhatóságú nukleáris mérőláncokra, távadat-gyűjtő és -feldolgozó, továbbá folyamatellenőrző és vezérlő berendezésekre alapozva;
- sugárhatásnak kitett szerkezeti, kenő- és hűtőanyagok vizsgálata, a fűtőelemek összetételének és kiegészi szintjének meghatározására szolgáló módszerek fejlesztése.

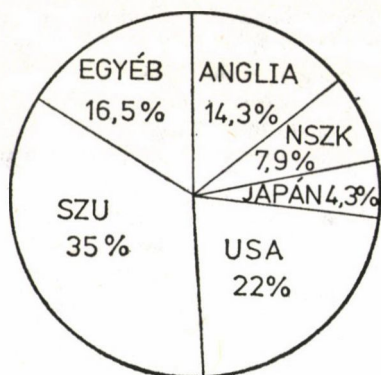
Természetes, hogy a főirányban megfogalmazott atomenergia kutatások szoros kapcsolatban vannak a hazai nyomottvízes atomerőművi egységek létesítési és üzemviteli feladataival. Ennek megfelelően a Nehézipari Minisztériummal és annak bázis-intézeteivel szoros együttműködés alakult ki. Ugyancsak fontos követelmény, hogy gyümölcsöző együttműködés alakuljon ki az atomerőművek egyes egységeinek hazai gyártásában érdekelt intézmények, vállalatok és a főirány feladatainak végrehajtásában részt vevő kutatóintézetek között. Ezen a téren eddig csak szerény eredményeket értünk el. Az atomenergia kutatási főirány egyes feladatai a környezetvédelmi célprogrammal, továbbá „az ember és természeti környezetének védelme”, valamint „az ember környezeti követelményrendszere” tárcaszintű főirányokkal is kapcsolatban vannak.

A főirány céljainak valóra váltása széles körű és hatékony nemzetközi együttműködést kíván. Két nagy szovjet társintézettel, a Kurosatov Atomenergia Intézettel, valamint az obnyinszki Fizikai Energetikai Intézettel és több más intézettel sok évre visszanyúló, eredményekben gazdag munkakapcsolat alakult ki. 1972-ben szovjet–magyar kezdeményezésre a szocialista integráció szellemében, kormányközi egyezmény alapján megalkult az ideiglenes nemzetközi kutató kollektíva a nyomottvízes atomerőművek fejlesztésével kapcsolatban egyes feladatok megoldására. Ez a kollektíva a Központi Fizikai Kutató Intézetben kapott helyet, ahol a szükséges tudományos háttér és mérés-technikai tapasztalat rendelkezésre állt. A kollektíva munkájában kezdettől fogva hét szocialista ország vesz részt, nemrég csatlakozott ezekhez Kuba. Egyébként — az eredményes munkára való tekintettel — 1977-ben újabb kormányközi megállapodással további öt évre meghosszabbították a kollektíva működését. A tapasztalatok szerint ez a nemzetközi együttműködési forma igen hatékony, mivel lehetővé teszi a kitűzött feladatok közös erővel történő gyors megoldását, és egyben minden részt vevő partner számára biztosítja a kollektíva által elért eredmények hasznosítását.

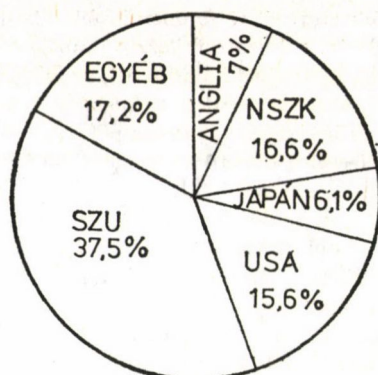
A magfúzió alapuló energiatermelés megvalósítása érdekében végzendő kutató- és fejlesztőmunka főbb feladatai

Az atomenergia békés felhasználásáról rendezett első ENSZ-konferencián, 1955-ben Genfben, *H. Bhabha*, az azóta elhunyt indiai fizikus, a konferencia elnöke, igen optimistán ítélte meg a termionukleáris reaktor megvalósíthatóságát és ezzel az emberiség energiagondjainak megoldását. Az eredmények azonban a vártnál lassabban születtek meg, bár a vezető nagyhatalmak (Szovjetunió, USA, Anglia) igen intenzív kutatómunkát folytattak.

Az 1940-es években megindult kutatásokról az első adatokat *I. V. Kurosatov* akadémikus tárta a nyilvánosság elé az 1956-os londoni látogatása során. 1958-ban az atomenergia békés felhasználásáról rendezett második ENSZ-konferencián és az ezt követő konferenciák során már megindult a tudományos információcsere. 1974-ben a Szovjetunió és az USA egyezményt írt alá a fúziós kutatásokban való együttműködésről.



1963



1971

3. ábra. A termonukleáris kutatásban való részvétel arányai 1963-ban és 1971-ben

Önálló és teljességre törekvő kutatási programmal azonban napjainkban csak a legnagyobb országok rendelkeznek. Anglia önálló programja mindinkább beolvad a Közös Piac tagországai között kialakulóban levő kutatási együttműködésbe. Az utóbbi években Japán és az NSZK is jelentős erőfeszítéseket tett a felzárkózásra. A fúziós kutatásokra fordított kapacitás országokénti megoszlását tükrözi az USA kongresszusának adatai alapján összeállított 3. sz. ábra.

Amint erről már szó volt, rendkívül eltérő becslések találhatók az irodalomban a Föld szén-, olaj- és urániumkészleteiről, de valamennyi előrejelzés egyezik abban, hogy a rohamosan növekvő fogyasztás mellett a készletek belátható időn belül kimerülnek. Az urániumkészletek jobb kihasználását lehetővé tevő szaporítóreaktorok építését a biztonsággal, a környezetvédelemmel összefüggő éles viták kísérik. Az USA-ban megtiltották az energiatermelő gyorsreaktorok építését. A szabályozott termonukleáris fúzió alapuló reaktorok előnyei ugyanakkor nagyon valószínűvé teszik jövőbeni széles körű elterjedésüket. Ezek az előnyök (a teljességre való törekvés nélkül) a következők:

- üzemanyag korlátlanul áll rendelkezésre (a világ 1973. évi energiaszükségletét 1-nek véve, a tengervíz deutériumtartalma változatlan fogyasztás mellett 10 milliárd évre elegendő üzemanyagot biztosít);
- a fúziós reaktor csaknem abszolút biztonságot nyújt, felrobbanása vagy megfutása elvileg is lehetetlen, a környezetet nem szennyezi.

A termonukleáris reaktor a könnyű atommagok szabályozott egyesülését (fúzióját) használja fel energiatermelés céljára. A szabályozott termonukleáris fúzió megvalósítására irányuló erőfeszítések két alapvető irányban folynak.

A „hagyományos” irányzat a *mágneses plazmatároló* berendezések fejlesztése. Ezek közül legeredményesebb és legtöbbet ígérő a Kurcsatov Atomenergia Intézetben kifejlesztett tokamak berendezés. (A szovjet fúziós kutatások fele ma tokamak kutatás.) A tokamak lényegében egy nagyméretű, speciális transzformátor, amely sűrű és rendkívül forró plazma előállítására és összetartására alkalmas; a felfűtött plazmagyűrű stabilizálására speciális szerkezetű, erős mágneses tér szolgál. A tokamak kutatás célja jelenleg a plazma hőmérsékletének, sűrűségének és stabilitásának növelése a gazdaságos energiatermeléshez szükséges küszöbérték elérése céljából. Pozitív energiamérleghez, azaz a

befektetettnél több energia felszabadításához nagyméretű tokamak berendezésekre van szükség. A kutató-fejlesztő munka a kis tokamakokkal kezdve, egyre nagyobb berendezések építésével halad a cél, az energiatermelő reaktor megvalósítása felé.

Újabb és részben titkosként kezelt kutatási irány a *mikrorobbantások* technikája. A parányi üzemanyagcseppent több oldalról rendkívül intenzív lézer- vagy elektronsugárzás (esetleg e kettő kombinációja) éri, és a cseppben végbemegy a termonukleáris reakció, energia szabadul fel.

Az egyre növekvő anyagi és szellemi ráfordítások oka az a reális remény, hogy a fúziós reaktorok a közeljövőben jelentős szerepet játszhatnak az energiaellátásban. Szovjet és amerikai források egybehangzóan prognosztizálják a fúziós reaktorok létrehozásának menetrendjét. Ez a következő: 1975 – 80 között reaktorhoz közelálló feltételek megvalósítása hidrogénplazmában; 1980 – 85 között kísérleti fúziós reaktor pozitív energiamérleggel; 1985 – 90 között 20 – 50 MW(e) teljesítményű reaktor; 1990 – 95 között 100 MW(e) teljesítményű erőművi reaktor; 1995 után 500 MW(e)-nél nagyobb teljesítményű reaktor. 2000 – 2020 között a fúziós reaktorok várhatóan már jelentős szerepet játszhatnak az energiatermelésben.

Érdemesnek látszik ezzel kapcsolatban a hasadási reaktorokra jellemző néhány időpontot megemlíteni, hogy a fejlődés vázolt menetrendjét a magfúziós reaktorok esetében reálisan ítélhessük meg. Közismert, hogy az első önmagát fenntartó maghasadási láncreakciót 1941-ben valósították meg. 1955-ben, tehát mindössze 14 év múlva már működött az első villamos energiát termelő atomerőmű. Az igaz, hogy még nem volt gazdaságos, és számos, előre nem látott technológiai probléma éppen ennek az első atomerőműnek a működése során merült fel, de a 60-as évek végére már — tehát újabb 15 év múlva — megjelentek a kereskedelemben az atomerőművek és a világ számos táján a gazdaságos energiatermelésnek fontos eszközeivé váltak. Ha a „break-even” időpontját — ami a hasadási reaktorok történetében 1941-nek felel meg — 1985–1990 között várhatjuk, akkor mintegy 20–30 évvel később, tehát a harmadik évezred első évtizede után reményünk lehet a gazdaságos magfúziós energiatermelő berendezések megjelenésére. Ha pedig még optimisták is akarunk lenni, akkor azt mondhatjuk, hogy ez az időtartam lerövidülhet, mert a 80–90-es évek technológiájának fejlettsége nyilván jóval nagyobb lesz, mint amilyen az 50-es éveké volt. Annyi bizonyos, hogy ennek a grandiózus programnak a megvalósításához nemcsak a legfejlettebb ipari országoknak, hanem az egész emberiségnek alapvető érdekei fűződnek.

Ezek után felmerül a kérdés: mik azok a *legfontosabb kutatási-fejlesztési feladatok*, amelyek a termonukleáris energiatermelés megvalósításához szükségesek? Úgy tűnik, hogy a kifejezetten plazmafizikai problémákról a súlypont egyre inkább a technológiai problémákra tevődik át, azonban ez nem jelenti azt, hogy nincsenek fontos megoldatlan problémák a plazma stabilitásának, sűrűségének, hőmérsékletének növelésével kapcsolatban. A plazma fűtésének különböző módszerei között sokat ígérőnek tűnik a neutrális részecskék injektálásának módszere. Arról van szó, hogy gyorsítóberendezéssel a deutérium ionokat kellő energiára gyorsítva, majd az ionokat neutralizálva, nagyenergiájú semleges részecskéket juttatnak a plazmatérbe, amelyek ott energiájukat az ionoknak átadva, jelentősen hozzájárulhatnak a plazma hőmérsékletének növeléséhez. Ennek a fűtési módszernek a megalapozásához fontos ismerni a neutrális részecskék és a plazma ionjai kölcsönhatásának törvényszerűségeit, és úgy tűnik, hogy ezen kölcsönhatásoknak a vizsgálata technológiai jelentőségük mellett elvileg is fontos feladat.

A kutatási és fejlesztési feladatokat — bizonyos leegyszerűsítésekkel — a következő öt csoportba lehet sorolni:

- plazmatechnológia,
- mágneses rendszerek,

- szerkezeti anyagok és sugárhatás-effektusok,
- rendszertechnika,
- környezetvédelem és üzembiztonság.

A plazmatechnológiában a fő figyelmet a fűtés és az üzemanyagbevitel kérdéseire, továbbá a plazmaszennyeződések felismerésére és megengedhető szinten való tartására fordítják. Fontos feladat a szén, nitrogén, vas, wolfram és molibdén atomok töltéscserével járó ütközési hatáskeresztmetszeteinek pontos meghatározása, mivel ezek a szennyeződések erős lehűlést okozhatnak a plazmában. Ugyancsak az érdeklődés homlokerében áll az infravörös lézersugárzással megvalósítható ionhőmérséklet-mérés tökéletesítése is.

A mágneses rendszerek terén a kutatás fő iránya a szupravezető mágnesek és anyagaik továbbfejlesztése, szupravezető energiátároló cellák és kapcsolók fejlesztése, homopoláros energiátároló gépek készítése.

A szerkezeti anyagok kutatásában az a legfontosabb cél, hogy olyan — a gazdaságosság és biztonság követelményeit kielégítő — anyagot találjanak, amely a magfúziós reaktor intenzív sugárzási terében jól használható. Jelenleg a felületi és térfogati sugárhatás-effektusok jobb megismerésére, a sugársérülések természetének felderítésére és dozimetriai módszerek tökéletesítésére törekednek. Új, igen nagy intenzitású neutronforrást hoznak létre a vizsgálatok elvégzésére. Fejlesztik a nagy sugártűrűsű, különleges mechanikai és felületkémi tulajdonságokkal rendelkező anyagok kiválasztására és előállítására szolgáló módszereket. Az egész világon felismerték, hogy a magfúziós energiatermelő reaktor létrehozásában a megfelelő szerkezeti anyagok megtalálása és ipari előállításának megvalósítása jelenti azt a kardinális eseményt, amelytől az egész vállalkozás sikere függ. Ezért fordítanak a szerkezeti anyagok kutatására különlegesen nagy figyelmet.

A rendszertechnikai kutatások előtt az a feladat áll, hogy a fúziós energiatermelő berendezés különböző részrendszereinek integrálásával olyan komplex rendszer alakuljon ki, amely lehetővé teszi különböző változatok egységes műszaki, gazdasági megítélését.

A környezetvédelmi és üzembiztonsági célokat szolgáló kutatások — a szokásos és triviális kérdéseken túl — kiterjednek a mágnesterek biológiai és környezeti hatásának felderítésére, továbbá a trícium és a neutronaktivációs termékek toksikus és más káros hatásainak elhárítására szolgáló módszerek kidolgozására.

Ebből a vázlatosan ismertetett programból is kitűnik, hogy csak az iparilag legfejlettebb országok vállalkozhatnak ennek a programnak a teljes megvalósítására. Mit tehetnek a kis, közepesen fejlett, vagy akár fejlett kategóriába tartozó országok? Mit tehet, pontosabban szólva, *mit célszerű tennie hazánknak* a magfúziós kutató, fejlesztő munka területén? Ismeretes, hogy a magfúziós kutatásoknak hazánkban nincsenek hagyományai. Önálló kutatási program megindításának még a gondolata is a realitásérzék teljes hiányát mutatná. Ugyanakkor súlyos hiba volna a kérdésre adandó válaszban figyelmen kívül hagyni azt a körülményt, hogy 20–30 év múlva a magfúziós energiatermelő berendezések már jelentős szerepet játszhatnak az energiaellátásban.

A termonukleáris erőművek komplexitása várhatóan lényegesen meghaladja majd az atomerőműveket, a telepítéshez és üzemeltetéshez a hagyományostól gyökeresen eltérő új technológiák alkalmazása is szükséges. Ilyenek pl. extrém nagyteljesítményű impulzus-technika, ultranagy vákuumok technikája, speciális plazmadiagnosztika, számítógépes on-line vezérléstechnika stb. Az új műszaki kultúra alapjainak hazai meggyökeresítése elképzelhetetlen szerény méretű hazai kutató-fejlesztő munka megindítása nélkül.

A következő negyedszázad felhasználható és felhasználandó arra, hogy a termonukleáris erőművek merőben új technikájának fogadására képes szakembergárda kialakuljon. Ez az alapvető cél úgy érhető el, hogy nemzetközi együttműködés keretében egyes

részterületeken, jól meghatározott kutatási feladatok megoldásában működnek közre magyar kutatók.

A hazai termonukleáris kutatások volumenére, lehetőségeire és céljaira vonatkozóan tanulságos összehasonlítási alapot kínál a reaktorkutatások története. Annak idején már a kutatóreaktor üzembe állítása előtt megkezdődött a szakemberek kiképzése a Szovjetunióban. A későbbiekben kétoldalú együttműködés keretében, a Kurcsatov Atomenergia Intézettel és az obnyinszki Fizikai-Energetikai Intézettel közösen, a magyar kutatók különböző kutatási feladatokat oldottak meg. A kutatók a nemzetközi együttműködés keretében önállóan oldottak meg több fontos részfeladatot. Az együttműködés során nagy felkészültségű kutatógárda nőtt fel hazánkban, amely saját eredményeivel nemzetközi elismerést vívott ki. Az eredményes kétoldalú együttműködés később a KGST országok sokoldalú együttműködésévé fejlődött.

Ezeknek a kedvező tapasztalatoknak az alapján indult meg az együttműködés a termonukleáris kutatások területén is a Kurcsatov Atomenergia Intézet és a Központi Fizikai Kutató Intézet között. A Központi Fizikai Kutató Intézetben kialakult magas színvonalú mérés-technikai és számítástechnikai kultúra, továbbá a kifejlesztett eszközök és berendezések meghonosítása a termonukleáris kutatásokban lényeges előrelépést jelenthet a szovjet kutatóknak. Ugyanakkor a magyar szakemberek megismerkedhetnek a szovjet tudományos eredményekkel, és egyes részterületeken bekapcsolódhatnak a kutatásokba. Ezekben a részterületeken jelentkező feladatokról szeretnék vázlatos áttekintést adni.

A termonukleáris fúziós berendezések következő generációjában (és a tudomány és technika sok más területén) fontos szerepet játszanak majd a *szupravezető mágnesek*. A szupravezető mágnesekhez szükséges egyes elektronikus berendezések hazai fejlesztése már korábban megindult és több készülék kifogástalanul működik a Szovjetunióban. Ezen a területen a hazai kutatási és gyártási tevékenység további megerősítése kívánatos.

Értékesnek ígérkező lehetőséget nyújtanak a hazai tapasztalatok arra, hogy a *plazma vizsgálatára*, diagnosztizálására használatos eljárások és módszerek továbbfejlesztésére eredményesen bekapcsolódjunk. Jól felhasználhatók a közös program megvalósításában a magfizikai, gyorsítóberendezés-fejlesztési és üzemeltetési, a lézerfizikai, a kémiai és más tapasztalatok.

Elméleti plazmafizikai vizsgálatok a KFKI-n kívül más intézetekben is folynak. Célszerű az egyéni kezdeményezésű elméleti kutatásokat a jövőben konkrét plazmafizikai problémák megoldására orientálni.

A fúziós erőművek tervezéséhez kapcsolódnak a debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Intézetében folyó magfizikai mérések, amelyek az alapvető adatok meghatározását és pontosítását célozzák.

A plazma-fal kölcsönhatás vizsgálatába való bekapcsolódást a KFKI-ban és az MTA Atommag Kutató Intézetében rendelkezésre álló magfizikai és szilárdtestfizikai ismeretek és tapasztalatok teszik lehetővé. A KFKI-ban meghonosított, az ún. „visszaszórásos” technika lehetőséget nyújt a forró plazmával kölcsönhatásba került felület szerkezetének vizsgálatára. Az ATOMKI-ban a fúziós reaktor szerkezeti anyagaiban végbemenő belső ionizációs folyamatok tanulmányozhatók. A kaskád- és Van de Graaff-gyorsítónál elektron, proton, alfa-részecske vagy nehézion besugárzás után kilépő röntgensugárzás vizsgálatával meghatározhatók a ma még nagyrészt ismeretlen hatáskeresztmetszetek. Vonzó, hogy az adatgyűjtés mellett elvi problémák is megoldásra várnak.

A szovjet–magyar közös kutatások sikeres megvalósítása érdekében a Kurcsatov Atomenergia Intézet egy kisméretű, könnyen üzemeltethető, tokamak típusú termonukleáris kísérleti berendezést (TT-3) ad át a Központi Fizikai Kutató Intézetnek. A TT-3 tokamak korszerű berendezés, kipróbálható rajta a mérési, diagnosztikai el-

járások, azok az eszközök, amelyek a Kurcsatov Atomenergia Intézet nagyberendezéseiben kerülnek majd felhasználásra. A TT-3 lehetőséget nyújt plazmafizikai folyamatok finom részleteinek tanulmányozására, új tudományos eredmények elérésére.

Az V. ötéves tervben a termonukleáris kutatások hazai megindítása jóváhagyásra került. Az MTA atomenergia kutatási főirányban a legfontosabb feladatok megfogalmazást nyertek.

A magfúziós kutatások áttekintése nem volna teljes, ha nem esne szó a *mikrorobbanásokon alapuló elképzelésekről*. Ezeknek közös lényege — erőteljes loegyszerűsítéssel — a következő: intenzív lézer-, elektron-, vagy ionnyaláb segítségével igen rövid idő alatt a magfúzió begyújtását lehetővé tevő hőmérsékletre kell fűteni a kezdetben normális sűrűségű, folyékony vagy szilárd halmazállapotú trícium-deutérium céltárgyat, amelyben robbanásszerűen végbemegy a termonukleáris reakció, és az így felszabaduló energia hasznosíthatóvá válik. Újabb és újabb céltárgyak egymást követő adagolásával a mikrorobbanások egész sorozatát lehet előidézni, és a rendszer — egyszerű hasonlattal élve — a belső égésű motorokhoz hasonlóan szolgáltat energiát.

A következőkben a lézersugárzás által iniciálhatónak vélt mikrorobbanás során lejátszódó folyamatokat tekintjük át. Nem sokkal azután, hogy a lézert felfedezték, *R. Zabawski* és *E. Teller* számításokat végeztek, hogy eldöntsék, lehet-e intenzív lézersugárzással kisméretű trícium-deutérium céltárgyat felrobbantani. A számítások azt mutatták, hogy normál sűrűségű kb. (10^{22} részecske/cm³) céltárgyban ilyen módon magfúziós robbanást inicálni nem lehet. Ha azonban a céltárgy sűrűsége a normális sűrűségnek tízezerszeresére volna növelhető, akkor a lézerral indukált magfúzió — legalábbis elvileg — megvalósíthatóvá válna. Ennek megértése érdekében egy rövid kitérőt kell tennünk.

A hagyományosnak tekinthető magfúziós berendezésekben a viszonylag kis sűrűségű (10^{14} részecske/cm³) és nagy térfogatú forró plazmát megfelelő erősségű és konfigurációjú mágnes tér tartja bezárva. A bezárás, az együtt tartás ideje (confinement time) ezekben a berendezésekben néhány tized másodperc, és feltehetően rövidesen eléri a néhány másodperc időtartamot. *J. D. Lawson* angol fizikusról nevezték el azt a kritériumot, amelynek alapján meg lehet ítélni, hogy végbemehet-e magfúzió a plazmában pozitív energiámérleggel. Feltételezve, hogy a felszabaduló energia egyharmada a reakció fenntartására szolgál, 10^8 K⁰ plazmahőmérséklet mellett a Lawson-kritérium igen egyszerű: az együtt tartási idő (τ) és a plazmasűrűség (P) szorzatának 10^{14} sec/cm³-nél nagyobbak kell lennie, azaz $\tau P \geq 10^{14}$ sec/cm³.

A mágnes teros plazmatárolókban a 10^{14} részecske/cm³ plazmasűrűség elérhető, ami azt jelenti, hogy $\tau < 1$ sec együtt tartási idő mellett a pozitív energiámérlegű magfúzió megvalósítható. A lézeres magfúziós berendezésekben a céltárgyból képződő plazmát annak inerciája tartja össze, ami azt jelenti, hogy az összetartási idő igen kicsiny, nem sokkal több, mint 10^{-12} másodperc. Rögtön beláthatjuk a Lawson-kritérium alapján, hogy ezt az időt csak kolosszális plazmasűrűséggel kompenzálhatjuk. Az elérendő sűrűség 10^{26} részecske/cm³, ami legfeljebb csak a csillagok belsejében alakulhat ki. Bár a feladat — legalábbis az első pillanatban — megoldhatatlannak látszik, a valóságban mégis van kiút, és ezt az a folyamat kínálja, ami a céltárgy felületén a lézersugárzás hatására lejátszódik. Annak érdekében, hogy ezt a sűrűséget el lehessen érni, azaz a normál sűrűséget tízezerszeresére lehessen növelni, legalább 10^{12} atmoszféra nyomásra van szükség. Hogyan lehet földi körülmények között ekkora nyomást — hacsak igen rövid időre is — előállítani? A válasz meglehetősen egyszerű. Tegyük fel, hogy a gömb alakú céltárgyat minden oldalról nagy, de azonos intenzitású lézersugárzás éri. A céltárgy felületén azonnal egy felületi plazmaréteg, egy felületi „atmoszféra” alakul ki. Ebben a viszonylag kis sűrűségű felületi plazmában abszorbeálódik a lézersugárzás részben elektron-ion ütközések, részben pedig plazmainstabilitások gerjesztése révén, és néhány ezer elektron volt

energiájú „forró”elektronokat hoz létre. A forró elektronok a felületi rétegből a céltárgy belseje felé haladva intenzív felületi párolgást okoznak, aminek hatására a kifelé repülő ionok impulzusával egyenlő, de ellentétes irányú lökések érik a felületet. Ezek a lökések igen nagy nyomást reprezentálnak, és a céltárgy belseje erőteljesen összezsugorodik. A jelenség nagyon emlékeztet a rakétahatásra. Minden egyes, nagy sebességgel kifelé távozó ion — mint egy kilőtt rakéta — meglöki a céltárgyat, amely ilyen módon implodál, azaz berobban. A berobbanás sebessége ötvénszer haladja meg a második kozmikus sebességet.

A berobbantás időbeli lefolyását pontosan kézben kell tartani. A lézersugárzás intenzitását fokozatosan kell növelni, hogy először a felületi réteg alakuljon ki, majd 1%-nál kisebb felületi inhomogenitással kell az erős párolgási folyamatot iniciálni. A berobbantásnak 10^{-8} sec-nál kisebb idő alatt kell bekövetkeznie.

Ezek után érdemes átgondolni, hogy a sűrűsénövelésnek milyen konzekvenciái várhatók. A magfúzió hatásfokát lényegében az együtt tartási idő és a reakció idő konkurenciája szabja meg. Mivel az inerciális együtt tartási idő a méret és a termikus sebesség hányadosával arányos, egy milliméter sugarú céltárgy esetében ez $2 \cdot 10^{-10}$ sec. A reakció idő pedig, amely a céltárgy sűrűségével fordítva arányos, mintegy $2 \cdot 10^{-7}$ sec normális sűrűség mellett. Ez azt jelenti, hogy a céltárgynak csak 0,1%-a ég el, ami a felhasznált 10^6 joul lézere energiájának csak egyharmadát adja vissza. Ha azonban a céltárgy sugarát tizedére komprimálja a párolgás, az együtt tartási idő tizedére, de — és ez az igen lényeges konzekvencia — a reakció idő egy ezred részére csökken, ami már 10%-os elégetési hatásfok elérését teszi lehetővé, és így a felhasznált lézere energia harmincszorosát kapjuk vissza. Ebből a gondolatmenetből világosan következik, hogy csak akkor lehetséges a felhasznált lézere energiánál lényegesen több energiát nyerni, ha a céltárgy nagy részét magfúzióra készítjük és ezt viszont csak a sűrűség drasztikus növelésével érhetjük el.

A sűrűsénövelésnek van még egy további fontos következménye. Nem kell az egész céltárgyat a magfúzió begyújtási hőmérsékletére fűteni, és így ezzel is lézere energiát takaríthatunk meg. Ennek az az oka, hogy a nagy sűrűségű céltárgy belsejében meginduló fúzióban felszabaduló alfa-részecskék hatótávolsága a komprimált céltárgy méreteinél jóval kisebb, sőt a 14 MeV energiájú neutronok hatótávolsága sem sokkal nagyobb a céltárgy sugaránál, és így az alfa-részecskék energiája, meg a neutronok energiájának egy része a céltárgy hőmérsékletének növelésére szolgál. A számítások szerint a komprimált céltárgyban az effektív begyújtási energiaszükséglet csak század része a normális sűrűségű céltárgy begyújtási energiaszükségletének. Mindezek a hatások igen lényegesek, mert elmaradásuk esetén a lézeres fúzió pozitív energiamérleggel megvalósíthatatlan lenne.

Az elmondottak után jogosan felmerülhet a kérdés, hogy rendelkezünk-e már a magfúzióhoz szükséges, kellő energiájú és hatásfokú lézerekkel. Ha a ma ismert nagyteljesítményű lézereket ebből a szempontból megvizsgáljuk, sajnos azt kell mondanunk, hogy azok nem elégítik ki a követelményeket. Most nem szeretnék a lézerfizika és technika ide vonatkozó kérdéseivel foglalkozni, csupán annyit jegyezek meg, hogy a jelenlegi ismeretek alapján nem látszik kilátástalannak mintegy 5000 joul energiájú lézer sugárforrás kifejlesztése, ami már több fontos kísérlet elvégzését lehetővé teszi. Annyi bizonyos, hogy a lézeres fúzió alapuló energiatermelés megvalósítása még hosszú időt és igen sokrétű, nagyon költséges kutató-fejlesztő munkát igényel. Úgy látszik, hogy az 1,06 mikron hullámhosszúságú sugárzást kibocsátó neodium-üveg lézerekkel a berobbantási kísérlet demonstrálható. Az eddigi kísérletekben sikerült megfigyelni impulzusonként mintegy $5 \cdot 10^7$ neutron keletkezését, ami a Lawson-kritérium által megkövetelt értéktől hat nagyságrenddel kisebb érték elérésére utal. A jelenlegi legfőbb feladat a megfelelő teljesítményű, hullámhosszúságú, rövid impulzusok előállítására alkalmas lézer kifejlesztése, a mikrorobbanás dinamikájának és alapvető folyamatainak feltárása, a céltárgy összeté-

telének és geometriájának kialakítása. Ebből a programból a hazai kutatók csak igen szerény feladatokat vállalhatnak magukra. Amire gondolni lehet, az az intenzív lézersugárzás és az anyag kölcsönhatásainak tanulmányozása, mivel ezen a területen kutatóink máris szép eredményeket mondhatnak magukénak.

Befejező gondolatok

Célom az volt, hogy felhívjam a figyelmet az energiakutatás globális jelentőségére és különösen arra a körülményre, hogy 20–30 év múlva az energiatermelésben a nukleáris energiát hasznosító erőművek részaránya lesz meghatározó. Ez minőségileg átalakítja az energiaipart, és ennek az átalakulásnak a következményeire időben fel kell készülni. Itt az ideje annak, hogy átfogó, hosszú távú kutatási, fejlesztési stratégiával rendelkezünk. Ennek alapján kell a hazai adottságokra és a nemzetközi munkamegosztásra épülő, konkrét programokat kidolgozni és megvalósítani.

Nem foglalkozhatok itt annak részletes bemutatásával, hogy egész gazdasági fejlődésünk dinamizmusát milyen alapvetően érinti az energiatermelés és racionális felhasználás rendszeres növekedésének biztosítása. A gazdaság intenzív fejlesztése elképzelhetetlen növekvő energia-felhasználás nélkül. A növekvő energia-felhasználással együtt kardinális jelentőségűvé válik az energiatakarékosság, pontosabban a rendelkezésre álló energia optimális felhasználásának biztosítása. Ez jelentős technológia-módosításokat, és kiterjedt kutató-fejlesztő munkát követel meg.

A nukleáris energiatermelésre való áttérés megköveteli a tudományos háttér állandó erősítését. Úgy vélem, hogy a meglévő szellemi és anyagi bázis erősítésével és megfelelően koordinált egységes irányításával sokat tehetünk a hazai energiakutatás és fejlesztés hatékonyságának növelése érdekében.

A KÖVETKEZŐ SZÁM TARTALMÁBÓL:

A tudomány népszerűsítése és a tudománynépszerűsítés (Beck Mihály)

Az atomenergia hazai hasznosításának tudományos-műszaki kérdései

A. M. Petroszjanc: Az atomenergetika — a Szovjetunió villamosenergia termelésének önálló ágazata

Szalay Sándor: Az atomenergia termelés sajátos nyersanyag szükségletei

Somogyi György: Egy új nukleáris metodika alkalmazása uránlokalizációs vizsgálatokra

Bozóky László: Sugárvédelmi kérdések az atomerőműveknél

Fehér István: Sugárvédelem a Paksi Atomerőműnél

Vita a kutatási- fejlesztési információ ellátás helyzetéről és az idegen szavak használatáról